



**TUGAS AKHIR - TM141585**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH BEBAN  
PENDINGINAN PADA EVAPORATOR *LOW  
STAGE* SISTEM REFRIGERASI *CASCADE*  
DENGAN *INTERMEDIATE PLATE HEAT  
EXCHANGER***

**ASEP ALAMSYAH RAMADANI  
NRP. 2112106012**

Dosen Pembimbing  
Ary Bachtiar K. P., ST., MT., Ph.D.

PROGRAM SARJANA  
LABORATORIUM TEKNIK PEMBAKARAN DAN BAHAN BAKAR  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**FINAL PROJECT - TM141585**

**EXPERIMENTAL STUDY OF COOLING LOAD  
EFFECT ON LOW STAGE EVAPORATOR OF  
CASCADE REFRIGERATION SYSTEM WITH  
PLATE HEAT EXCHANGER AS ITS  
INTERMEDIATE**

**ASEP ALAMSYAH RAMADANI**  
**NRP. 2112106012**

**Academic Supervisor**  
**Ary Bachtiar K. P., ST., MT., Ph.D.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2015**

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH BEBAN**  
**PENDINGINAN PADA EVAPORATOR *LOW STAGE***  
**SISTEM REFRIGERASI *CASCADE* DENGAN**  
***INTERMEDIATE PLATE HEAT EXCHANGER***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Asep Alamsyah Ramadan**

NRP. 2112 106 012

Disetujui oleh Tim Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ary Bachtiar KP ST., MT., Ph.D. ..... (Pembimbing)  
(NIP. 19710524199702100F)
2. Prof. Dr. Ir. Djamiko Ichsan, M. Eng ..... (Penguji I)  
(NIP. 19531019179031003)
3. Ir. Kadarisman ..... (Penguji II)  
(NIP. 194901091974121001)

**SURABAYA**  
**APRIL, 2015**

# **STUDI EKSPERIMEN PENGARUH BEBAN PENDINGINAN PADA EVAPORATOR LOW STAGE SISTEM REFRIGERASI CASCADE DENGAN INTERMEDIATE PLATE HEAT EXCHANGER**

**Nama** : ASEP ALAMSYAH RAMADANI  
**NRP** : 2112 106 012  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ary Bachtiar K. P., ST., MT., Ph.D.

## **Abstrak**

*Peningkatan taraf hidup manusia yang terjadi pada zaman sekarang menuntut teknologi untuk terus berevolusi menjadi lebih baik di setiap harinya. Salah satu teknologi yang berkembang adalah sistem pendingin yang mampu menurunkan temperatur jauh di bawah 0°C seperti yang diaplikasikan pada cold storage, blast freezer, dll. Sistem tersebut banyak diaplikasikan di dunia industri dengan dengan aplikasi nyata seperti penyimpanan makanan yang memberikan beban yang berbeda-beda. Hal tersebut menyebabkan adanya pengaruh beban terhadap sistem. Selain itu, penggunaan intermediate yang berbeda pun menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi sistem seperti penggunaan intermediate tipe concentric tube pada penelitian sebelumnya. Guna meningkatkan performa Sistem Refrigerasi Cascade maka dilakukan eksperimen terhadap sistem refrigerasi dengan beban yang berbeda-beda serta intermediate yang lebih baik seperti Plate Heat Exchanger.*

*Pengujian Sistem Refrigerasi Cascade ini menggunakan refrigeran Muscocal-22 pada High Stage dan R-404a pada Low Stage dengan 8 titik pengukuran temperatur dan tekanan. Saat pengukuran dilakukan, sistem diberikan beban pendinginan berupa kalor yang dihasilkan oleh electric heater dimana beban tersebut terpasang di dalam kabin sehingga kalor yang dihasilkan oleh electric heater dapat diserap oleh evaporator*

*Low Stage. Beban yang divariasikan dari electric heater tersebut adalah 0 (tanpa beban), 70, 140, 210, dan 300 Watt. Pengukuran dan pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan dilakukan setiap 5 menit sekali.*

*Hasil yang didapatkan dari eksperimen ini adalah adanya pengaruh perubahan beban yang semakin besar terhadap kinerja dari sistem. Temperatur evaporator terendah yang dapat dicapai oleh sistem adalah  $-38.3^{\circ}\text{C}$  dan temperatur terendah pada kabin adalah  $-33.3^{\circ}\text{C}$ . Sementara nilai maksimal dari kapasitas pendinginan dan kalor yang dibuang oleh kondensor High Stage (Heat Rejection) adalah 0.5613 kW dan 1.1249 kW. Nilai maksimal dari performa sistem atau COP adalah 0.9959 dan Heat Rejection Ratio tertinggi adalah 2.048. Untuk nilai kerja kompresi sistem yang dipengaruhi beban memiliki nilai terbesar 0.3611 kW untuk sistem Low Stage dan 0.244 kW untuk sistem High Stage.*

**Kata kunci: Sistem Refrigerasi, Cascade, Plate Heat Exchanger, COP<sub>cascade</sub>**

# **EXPERIMENTAL STUDY OF COOLING LOAD EFFECT ON LOW STAGE EVAPORATOR OF CASCADE REFRIGERATION SYSTEM'S WITH PLATE HEAT EXCHANGER AS ITS INTERMEDIATE**

**Name** : ASEP ALAMSYAH RAMADANI  
**NRP** : 2112 106 012  
**Departement** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Academic Supervisor** : Ary Bachtiar K. P., ST., MT., Ph.D.

## ***Abstract***

*The increasing of human being lifestyle in now day era is forcing the technology to make a better revolution in every day. One of the greatest revolution is refrigeration system side, which can reach down below 0°C as applied to cold storage, blast freezer, ect. The most applied system is in many food industries with many different load given in, then influences whole of the running system. In another case, the used of different kind of intermediate in every single system will make system runs differently like what the past research did as well. To make the renewable system with better performance that the loads are still used in, it's used Plate Heat Exchanger as its intermediate.*

*This research of Cascade Refrigeration System used MC-22 in high stage and R-404a in low stage with 8 measuring points of temperature and pressure. When the measurement is made, the loads are given in vary values which generated from electric heater then the the heat of it can be absorbed by the low evaporator. The vary valued loads of electric heater are o (electric heater is off), 70, 140, 210 and 300 Watt and the measurement is made in 5 times and being measured every 5 minutes in range.*

*The result of this research is the influences of the greater loads which given in, they really are. The lowest evaporator temperature is settled in  $-38.3^{\circ}\text{C}$  and the lowest cabin temperature is  $33.3^{\circ}\text{C}$ . Beside them, the maximum cooling load and heat rejected by High Stage condenser are 0.5613 kW and 1.1249 kW for each of them. The greatest COP is settled in 0.9959 and The highest Heat Rejection Ratio is 2.048. For the compression of compressor, the biggest result is 0.3611 kW of Low Stage and 0.244 kW of High Stage.*

***Keywords: Refrigeration System, Cascade, Plate Heat Exchanger, COP<sub>cascade</sub>***

## KATA PENGANTAR

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan,  
sungguh bersama kesulitan itu ada kemudahan”  
(QS : Al-Insyirah : 5-6)

Puji Syukur Alhamdulillah Penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, Tuhan Semesta Alam, Maha Pemberi Ilmu, Maha Pemberi Rizqi, dan Maha Akan Segalanya atas limpahan rahmat, hidayah, rizki, dan izin-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa terselesaikannya tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak baik langsung maupun tidak langsung, moril dan non moril. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Keluarga besar Bapak H. Dastam Raksawijaya yang selama ini telah memberi kn kasih sayang, perhatian dan doa kepada penulis.
2. Ibu penulis tercinta, Hj. Eti Suhaeti yang tiada hentinya memebrikan penulis kasih sayang, dukungan serta doa yang tidak ada duanya. Terimakasih banyak mah.
3. Adik-adikku Hilma St. Masrifah dan Arya Moch. Happy yang telah memberikang doa serta semangat setiap saat.
4. Keluarga penulis di Surabaya Dra. Soelistriani (Mba Lis), Mba Nunuk, Om Iwan, Mba Rista, Mas Tikno, Mbah Kristin, Bude Martha, Om Sentot, dan keluarga besar lainnya di Surabaya yang telah memebrikan penulis dukungan dan doa selama ini.
5. Bapak Ary Bachtiar K. P., ST., MT., Ph.D selaku pembimbing penulis, terimakasih Pak atas bimbingan dan didikan Bapak.
6. Bapak Prof. Dr. Ir. Djatimko Ichsani., M. Eng, dan Bapak Ir. Kadarisman selaku penguji penulis. Terimakasih telah



meluangkan waktu dan bersedia berbagi ilmu dengan penulis.

7. Bapak Atok Setiawan selaku dosen wali penulis yang telah membina penulis dari awal masuk hingga lulus.
8. Seluruh dosen Teknik Mesin FTI-ITS yang telah bersedia memberikan ilmu dan pengalaman kepada penulis.
9. Pak Minto dan Mas Erdin yang tak kenal lelah membantu penulis dalam tugas akhir ini serta semua karyawan Teknik Mesin FTI-ITS.
10. Muhamad Fauzi P selaku *Partner in Crime* penulis selama melaksanakan tugas akhir. Nuhun pisan bro.
11. Teman-teman Lab Pendingin yang selalu meramaikan lab. SOB Konco Plek yo.
12. Teman-teman kontrakan Bandung Denis, Syukri, Kang Randi, Deni, Kang Restu, Uji, Agung, Master Wawan, Asded dan Mey yang selalu memberikan dukungan baik suka ataupun duka. Semangat bro.
13. Keluarga LJ Genap 2012 yang telah melangkah bersama penulis dari awal kuliah di ITS hingga lulus. Semangat terus rek.
14. Semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, Terima kasih atas semuanya

Penulis sangat berharap dengan terselesaikannya laporan tugas akhir ini penulis dapat memberikan inspirasi, semangat dan manfaat bagi pembaca. Demi kemajuan ilmu pengetahuan penulis pun kmengharapkan kritik dan saran dari pembaca sehingga penulis dapat meperbaiki kesalahan penulis.

Surabaya, Juli 2014

Penulis

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii

## **BAB I PENDAHULUAN**

1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	4
1.5. Manfaat Hasil Penelitian.....	4

## **BAB II TINJAUAN PUSTKA DAN DASAR TEORI**

2.1. Tinjauan Pustaka .....	6
2.1.1. Yin Sung (2012).....	6
2.2.2. Okky Mufadhol D.K (2012) .....	7
2.2.3. Arrad Ghani S (2013) .....	8
2.2. Sistem Refrigerasi .....	9
2.2.1. Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Ideal.....	9
2.2.2. Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Aktual.....	11
2.3. Zat Pendingin ( <i>Refrigerant</i> ) .....	12
2.4. Sistem Refrigerasi <i>Cascade</i> .....	13
2.5. <i>Intermediate</i> .....	23

## **BAB III METODE PENELITIAN**

3.1. Diagram Alir ( <i>flowchart</i> ) Penelitian.....	27
3.2. Pengujian Performa Sistem Refrigeraasi <i>Cascade</i> .....	28

3.2.1. Peralatan yang Digunakan .....	29
3.2.2. Skema dan Peralatan Uji Sistem Refrigerasi <i>Cascade</i> .....	30
3.2.3. Rancangan Percobaan .....	37
3.2.4. Prosedur Pengujian Sistem Refrigerasi <i>Cascade</i> .....	37
3.2.5. Diagram Alir ( <i>Flowchart</i> ) Pengambilan Data.....	40

#### **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

4.1. Data Hasil Percobaan .....	43
4.2. Contoh Perhitungan .....	43
4.2.1. Perhitungan Laju Aliran Massa Refrigeran .....	44
4.2.2. Perhitungan Kerja Nyata kompresor .....	47
4.2.3. Perhitungan $Q$ Kondensor <i>High Stage</i> .....	48
4.2.4. Perhitungan $Q$ Evaporator <i>Low Stage</i> .....	48
4.2.5. Perhitungan <i>Coefficient of Performance</i> (COP) <i>Cascade</i> .....	48
4.2.6. Perhitungan <i>Heat Rejection Ratio</i> (HRR) <i>Cascade</i> .....	49
4.2.7. Perhitungan <i>Effectiveness Plate Heat</i> <i>Exchanger</i> .....	49
4.3. Analisis Grafik.....	52
4.3.1. Grafik Temperatur LS dan Kabin = $f$ (Beban Pendinginan).....	52
4.3.2. Grafik Laju Aliran Massa Refrigeran = $f$ (Beban Pendinginan).....	53
4.3.3. Grafik Kerja Nyata Kompresor LS dan HS = $f$ (Beban Pendinginan).....	55
4.3.4. Grafik Kapasitas Pendinginan = $f$ (Beban Pendinginan).....	57
4.3.5. Grafik <i>Heat Rejection High Stage</i> $f$ (Beban Pendinginan) .....	58
4.3.6. Grafik $COP_{cas} = f$ (Beban Pendinginan).....	59

4.3.7. Grafik HRR LS dan HS = f (Beban Pendinginan).....	61
4.3.8. Grafik <i>Effectiveness</i> ( $\epsilon$ ) <i>PlateHeat Exchanger</i> = f (Beban Pendinginan).....	62
4.4. Analisis Diagram P-h .....	63
4.4.1. Diagram P-h Sistem <i>High Stage</i> .....	63
4.4.2. Diagram P-h Sistem <i>Low Stage</i> .....	66
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1. Kesimpulan.....	69
5.2. Saran .....	70
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>71</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

***(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)***

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan <i>Properties</i> MC-22 dan R-22.....	13
Tabel 4.1	Data Hasil Pengukuran dengan Beban Nol .....	43
Tabel 4.2	<i>Properties</i> Kabin ( <i>Cooling Box</i> ) .....	44
Tabel 4.2	<i>Overall Heat Coefficient</i> Kabin pada Beban.....	45

***(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)***

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Grafik Hasil Penelitian Yin Sung, 2012 .....	6
Gambar 2.2	Grafik Hasil Penelitian Okky Mufadhol D.K, 2012 .....	7
Gambar 2.3	Grafik Hasil Penelitian Arrad Ghani S, 2013 .....	8
Gambar 2.4	Sisistem Refrigerasi Kompresi Uap.....	9
Gambar 2.5	Diagram P-h dan T-s Siklus Refrigerasi Sederhana .....	10
Gambar 2.6	Diagram P-h Siklus Refrigerasi Aktual .....	11
Gambar 2.7	Rangkain Komponen Sistem Rafrigerasi <i>Cascade</i> .....	14
Gambar 2.8	Penggambaran Konsep Siklus Refrigerasi <i>Cascade</i> pada Diagram P-h .....	15
Gambar 2.9	Skema dan Titik-titik Pengukuran pada Kabin .....	17
Gambar 2.10	Skema Arah Aliran dan Titik-titik Pengukuran pada <i>Intermediate</i> .....	18
Gambar 2.11	Skema Diagram P-h Sistem Refrigerasi <i>Cascade</i> .....	20
Gambar 2.12	Skema Sistem Refrigerasi <i>Cascade</i> .....	22
Gambar 2.13	PHE yang Digunakan .....	24
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	28
Gambar 3.2	Skema Alat Uji Sistem Refrigerasi <i>Cascade</i> ...	53
Gambar 3.3	(a) Kompresor <i>High Stage</i> , (b) Kompresor <i>Low Stage</i> .....	31
Gambar 3.4	Kondensor <i>High Stage</i> .....	32
Gambar 3.5	<i>Plate Heat Exchanger</i> .....	32
Gambar 3.6	Dimensi <i>Plate Heat Exchanger</i> .....	32
Gambar 3.7	Evaporator <i>Low Stage</i> .....	33
Gambar 3.8	(a) <i>Capillary Tube High Stage</i> (b) TXV <i>Low Stage</i> .....	33



Gambar 3.9	(a) <i>Liquid Receiver High Stage</i> (b) <i>Liquid Receiver Low Stage</i> .....	34
Gambar 3.10	<i>Filter Dryer High Stage dan Low Stage</i> .....	35
Gambar 3.11	<i>Gate Valve</i> .....	35
Gambar 3.12	<i>Electric Heater</i> .....	36
Gambar 3.13	Kabin Sistem.....	36
Gambar 3.14	Kabin dengan <i>Electric Heater</i> .....	37
Gambar 3.15	Diagram Alir Pengambilan Data .....	41
Gambar 4.1	Grafik Temperatur LS dan Kabin = f(Beban Pendinginan .....	52
Gambar 4.2	Grafik Laju Aliran Massa Refrigeran = f(Beban Pendinginan .....	53
Gambar 4.3	Grafik Kerja Nyata Kompresor LS dan HS = f(Beban Pendinginan .....	55
Gambar 4.4	Grafik Kapasitas Pendinginan = f(Beban Pendinginan .....	57
Gambar 4.5	Grafik <i>Heat Rejection High Stage</i> = f(Beban Pendinginan .....	58
Gambar 4.6	Grafik COP <sub>cas</sub> = f (Beban Pendinginan).....	59
Gambar 4.7	Grafik HRR LS dan HS = f(Beban Pendinginan .....	61
Gambar 4.8	Grafik <i>Effectiveness (ε) Plate Heat Exchanger</i> = f(Beban Pendinginan .....	62
Gambar 4.9	Hasil Plot Kurva Kerja Sistem <i>High Stage</i> dengan <i>Software Coolpack</i> .....	63
Gambar 4.10	Hasil Plot Kurva Kerja Sistem <i>Low Stage</i> dengan <i>Software Coolpack</i> .....	66



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Peningkatan kebutuhan hidup manusia yang semakin tinggi menyebabkan sekelompok manusia berlomba-lomba untuk meningkatkan kualitas hidupnya dengan cara meningkatkan teknologi agar dapat terus berkembang ke arah yang semakin baik sehingga kebutuhan hidupnya dapat terpenuhi dengan kualitas yang baik. Peningkatan tersebut terjadi di dalam berbagai macam sektor salah satunya adalah sistem pendingin. Peningkatan di sektor tersebut menyebabkan evolusi teknologi pendingin yang semakin canggih. Salah satu perubahan yang baik yang dapat dirasakan adalah sistem pendingin yang hemat daya namun dapat mencapai temperatur yang jauh di bawah 0°C.

Salah satu sistem pendingin yang dapat mencapai temperatur rendah (jauh di bawah 0°C) adalah Sistem Refrigerasi *Cascade* dimana sistem tersebut menggabungkan dua Sistem Refrigerasi Kompresi Uap (*Vapor Refrigeration System*). Pada sistem tersebut evaporator sistem pertama (*High Stage*) dihubungkan dengan kondensor sistem lainnya (*Low Stage*) dengan bantuan suatu alat yang disebut dengan *intermediate*. Kedua Sistem Refrigerasi Kompresi Uap tersebut menggunakan refrigeran yang berbeda sehingga beda titik didih dari kedua jenis refrigeran akan menyebabkan Sistem Refrigerasi *Cascade* bekerja pada temperatur maksimal (*lowest temperature*). Sistem tersebut banyak digunakan di industri makanan sebagai *cold storage* yang dapat menampung produk dengan jumlah beban pendinginan produk yang berbeda-beda namun tidak hanya dapat digunakan pada pendinginan makanan dengan menjaganya pada temperatur rendah namun dapat juga digunakan untuk sistem refrigerasi dengan pendinginan cepat (*blast freezer*), pencairan gas (*cryogenic*), dll.

Realita pengaplikasian Sistem Refrigerasi *Cascade* di dunia industri tentunya menggunakan beban yang berbeda-beda



dari beban terkecil sampai dengan beban maksimal (*fully loaded*). Beban-beban yang diberikan pada sistem tersebut tentunya akan berpengaruh terhadap sistem baik pada parameter-parameter terkait seperti temperatur evaporator, temperatur kabin, kerja kompresi, dll yang dapat dicapai atau pun pada unjuk kerja sistem pendingin yang disebut COP (*Coefficient of Performance*), maka dari itu perlu dilakukan penelitian untuk mengkaji pengaruh beban terhadap Sistem Refrigerasi *Cascade* tersebut. Selain itu, penggunaan jenis *intermediate* yang berbeda-beda pada setiap sistem pun akan menghasilkan performa yang berbeda karena setiap *intermediate* memiliki *effectiveness* yang berbeda-beda selain.

Penelitian mengenai Sistem Refrigerasi *Cascade* tentunya telah beberapa kali dilakukan seperti salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Arrad Ghani Safitra (2013) mengenai Sistem Refrigerasi *Cascade* menggunakan refrigeran hidrokarbon Muscool-22 pada *High Stage*, R-404a pada *Low Stage* dan *intermediate* yang digunakan adalah jenis *concentric tube*. Penelitian tersebut dilakukan dengan memvariasikan beban pada *Low Stage* (evaporator) sehingga didapatkan temperatur evaporator terendah sebesar  $-37.1^{\circ}\text{C}$  dan temperatur kabin sebesar  $-36.5^{\circ}\text{C}$ . Sementara itu, penelitian kali ini menggunakan *intermediate* jenis *plate* atau lebih dikenal PHE (*Plate Heat Exchanger*) dimana PHE dikategorikan sebagai alat penukar kalor yang lebih efisien dan efektif dalam pertukaran kalor antara kalor dari evaporator (*High Stage*) dan kondensor (*Low Stage*) dibandingkan dengan *intermediate* jenis *concentric tube* selain itu, *Plate Heat Exchanger* memiliki kapasitas *heat transfer* yang lebih besar dibandingkan dengan *heat transfer* yang terjadi pada *concentric tube* sehingga PHE atau *Plate Heat Exchanger* diyakini dapat meningkatkan unjuk kerja dari Sistem Refrigerasi *Cascade*.



## **1.2 Perumusan Masalah**

Sehubungan dengan penelitian mengenai Sistem Refrigerasi *Cascade* ini maka permasalahan yang akan dibahas adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana unjuk kerja (T evaporator, Temperatur kabin,  $Q_e$ ,  $Q_c$ , W, COP dan HRR) yang dapat dicapai Sistem Refrigerasi *Cascade* menggunakan refrigeran MC-22 pada *High Stage* dan R-404a pada *Low Stage* dengan *Plate Heat Exchanger* baik beban nol (tanpa beban), 70, 140, 210, dan 300 Watt?
2. Bagaimana *Effectiveness* dari *Plate Heat Exchanger* yang digunakan pada Sistem Refrigerasi *Cascade* menggunakan refrigeran MC-22 pada *High Stage* dan R-404a pada *Low Stage*?

## **1.3 Batasan Masalah**

Agar pengujian yang dilakukan tidak keluar dari permasalahan yang ingin dicari pemecahannya, maka ditentukan batasan permasalahan. Adapun batasan masalah untuk penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Percobaan ini dilakukan di Laboratorium Pendingin Teknik Mesin ITS.
2. Refrigeran yang digunakan adalah Musicool-22 pada *High Stage* dan R-404a pada *Low Stage*.
3. *Plate Heat Exchanger* yang digunakan adalah merek SWAP produksi Malaysia dengan kapasitas 1 PK.
4. Pengujian alat hanya dilakukan pada kondisi tunak (*steady state*).
5. Energi kinetik dan energi potensial diabaikan.
6. Variasi beban pendinginan berupa panas yang bersumber dari *electric heater* dengan daya nol (tanpa beban), 70, 140, 210, dan 300 Watt.
7. Alat ekspansi yang digunakan pada penelitian ini adalah pipa kapiler di *High Stage* dan TXV di *Low Stage*.



8. Kompresor yang digunakan pada sistem tersebut adalah jenis *hermetic reciprocating* pada *Low Stage* dan *hermetic rotary* pada *High Stage* dengan daya 1 PK pada masing-masing kompresor.
9. *Properties* untuk refrigeran Musicool-22 menggunakan *properties* refrigeran R-290 (*Propane*).
10. Laju aliran massa refrigeran di *Low Stage* menggunakan kesetimbangan antara kalor yang diserap oleh evaporator *Low Stage* dengan beban yang dilapaskan oleh sistem di dalam kabin.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui unjuk kerja (Temperatur evaporator, temperatur kabin,  $Q_e$ ,  $Q_c$ ,  $W$ , COP dan HRR) yang dapat dicapai Sistem Refrigerasi *Cascade* menggunakan refrigeran MC-22 pada *High Stage* dan R-404a pada *Low Stage* dengan *Plate Heat Exchanger* baik beban nol (tanpa beban), 70, 140, 210, dan 300 Watt.
2. Untuk mengetahui *Effectiveness* dari *Plate Heat Exchanger* yang digunakan pada Sistem Refrigerasi *Cascade* menggunakan refrigeran MC-22 pada *High Stage* dan R-404a pada *Low Stage*.

#### **1.5 Manfaat Hasil Penelitian**

Dari hasil penelitian ini, manfaat yang didapatkan adalah sebagai berikut.

1. Sebagai pengembangan penelitian di Indonesia.
2. Memberikan sumbangan pemikiran bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta memberikan informasi seluas-luasnya kepada masyarakat tentang Sistem Refrigerasi *Cascade*.



## BAB II

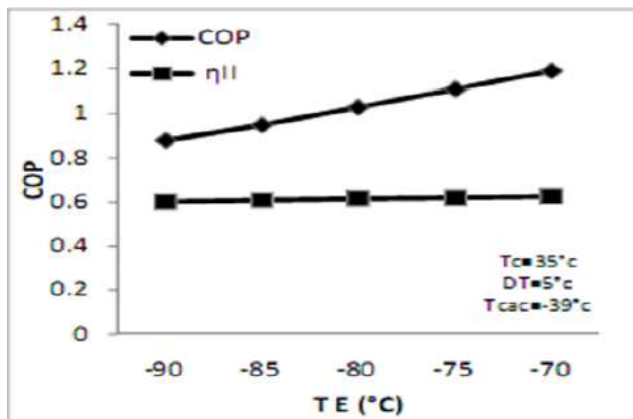
### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Refrigerasi merupakan suatu proses penyerapan kalor pada suatu media yang bertemperatur tinggi menjadi media bertemperatur rendah kemudian menjaga kondisi dari media tersebut pada temperatur yang diinginkan (*desired point*). Perpindahan temperatur tersebut dapat terjadi dengan bantuan suatu sistem yang disebut sistem refrigerasi.

Salah satu sistem refrigerasi yang banyak digunakan adalah Sistem Refrigerasi *Cascade*, dimana sistem refrigerasi tersebut memanfaatkan dua Sistem Refrigerasi Kompresi Uap dengan prinsip simbiosis mutualisme antar keduanya.

##### 2.1.1 Yin Sung (2012)



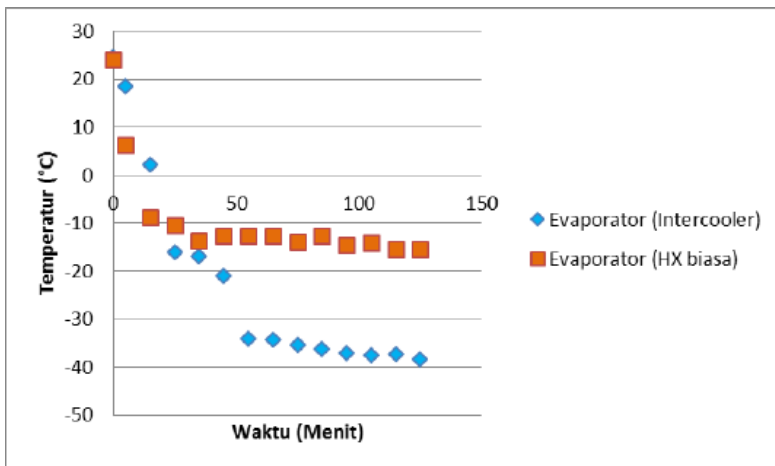
Gambar 2.1 Grafik Hasil Penelitian Ying Sun, 2012

Gambar di atas merupakan grafik hasil penelitian Yin Sung dimana Yin Sung melakukan eksperimen dengan membuat *Cooling Box* dengan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap dan Sistem Refrigerasi *Cascade*. Pada Sistem Refrigerasi Kompresi



Uap Y. Sung hanya menggunakan R-22 saja sementara pada Sistem Refrigerasi *Cascade* Y. Sung menggunakan R-22 untuk *High Stage* dan R-13 untuk *Low Stage*. *Intermediate* yang digunakan adalah jenis *Concentric Tube*. Hasil dari eksperimennya didapatkan sistem dengan R-22 saja temperatur evaporator (TE) dapat mencapai  $-20^{\circ}\text{C}$  sementara dengan Sistem Refrigerasi *Cascade*, TE dapat mencapai  $-65^{\circ}\text{C}$ . Pada gambar 2.1 di atas dijelaskan pula nilai COP mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan nilai temperatur evaporator dan eksergi.

### 2.1.2 Okky Mufadhol D. K (2012)



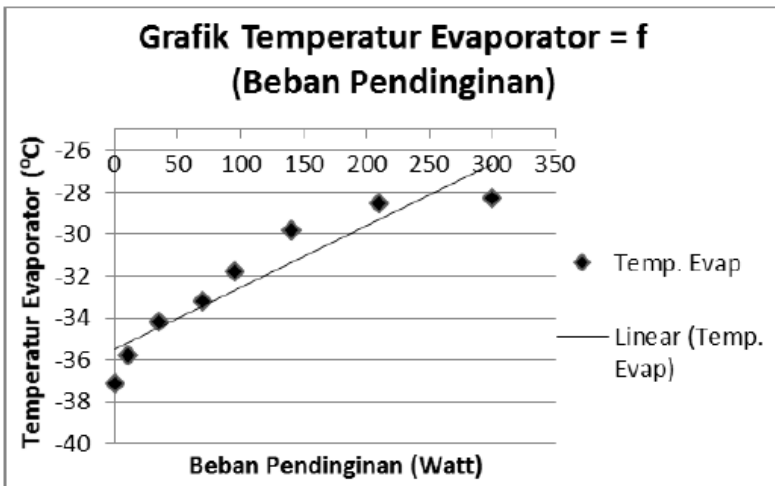
Gambar 2.2 Grafik Hasil Penelitian Okky Mufadhol D. K, 2012

Okky merancang Sistem Refrigerasi *Cascade* dengan menggunakan *intermediate* berupa *intercooler* dan gabungan evaporator dan kondensor pada masing-masing sisi (*Compact Heat Exchanger*). *Intercooler* digunakan sebagai penampung refrigeran cair keluaran evaporator (*High Stage*) dan tempat yang dilewati oleh pipa kondensor (*Low Stage*) sehingga akan terjadi kontak antara refrigeran cair dan pipa kondensor sehingga mengakibatkan terjadi pertukaran kalor di antara keduanya.



Sementara pada *Compact Heat Exchanger* kontak yang terjadi tidak terjadi secara langsung. Refrigeran yang digunakan adalah R-22 pada *High Stage* dan R-404a pada *Low Stage*. Pada gambar 2.2 di atas menunjukkan bahwa semakin lama sistem bekerja maka temperatur evaporator semakin rendah, selain itu temperatur maksimal evaporator adalah sebesar  $-38.4^{\circ}\text{C}$  dengan temperatur kabin  $-33^{\circ}\text{C}$  jika sistem menggunakan *Intercooler* dan temperatur maksimal evaporator sebesar  $-15.2^{\circ}\text{C}$  dengan temperatur kabin sebesar  $-4.6^{\circ}\text{C}$  jika digunakan *Compact Heat Exchanger*.

### 2.1.3 Arrad Ghani S (2013)



Gambar 2.3 Grafik Hasil Penelitian Arrad Ghani Safitra, 2013

Arrad Ghani S pun melakukan eksperimen dengan merancang Sistem Refrigerasi *Cascade* dengan menggunakan *Concentric Tube*. Jenis refrigeran yang digunakan adalah MC-22 pada *High Stage* dan R-404a pada *Low Stage*. Pada gambar 2.3 di atas dijelaskan bahwa temperatur evaporator mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya nilai beban sehingga *trend* yang terjadi cenderung mengalami kenaikan. Dari



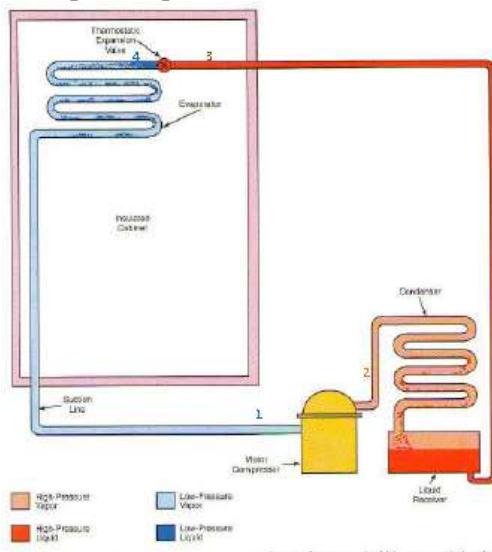


penelitiannya Arrad mendapatkan nilai temperatur evaporator terendah yaitu sebesar  $-37.1^{\circ}\text{C}$ .

## 2.2 Sistem Refrigerasi

### 2.2.1 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Ideal

Sistem Refrigerasi Kompresi Uap adalah sistem refrigerasi yang mengalami penguapan dan pengembunan. Sistem ini banyak diaplikasikan pada sistem pengkondisian udara (*air conditioning system*) atau pun refrigerator rumah tangga (*domestic refrigeration*). Sistem ini memiliki empat komponen utama yaitu kompresor, kondensor, alat ekspansi dan alat ekspansi yang dihubungkan dengan sistem pemipaan sehingga dapat mengalirkan refrigeran dan menghasilkan proses berulang (siklus) selama empat komponen tersebut bekerja. Berikut adalah siklus refrigerasi kompresi uap.

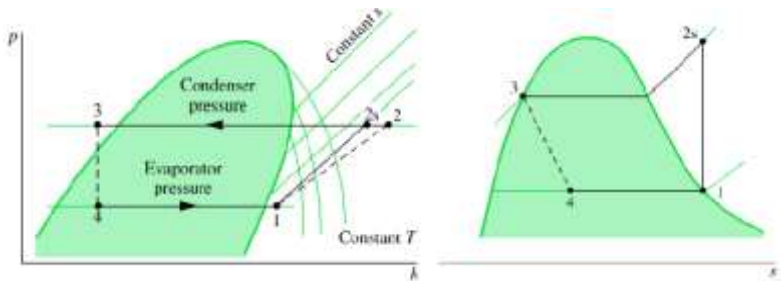


Gambar 2.4 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Sederhana (Sumber : *Modern Refrigeration and Air Conditioning*, Althouse, 2004)



Keterangan :

- ✓ 1-2 : Kompresi Isentropis (*reversible adiabatic*)
- ✓ 2-3 : Kondnsasi Isobaris
- ✓ 3-4 : Ekspansi Isentalpis(*reversible adiabatic*)
- ✓ 4-1 : Evaporasi Isobaris



Gambar 2.5 Diagram P-h dan T-s Siklus Refrigerasi Sederhana  
(Sumber : *Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5th*,  
MJ. Moran, HN. Shapiro, 2006)

❖ Proses Kompresi (1-2s dan 1-2)

Proses ini merupakan proses penekanan refrigeran bertekanan rendah menjadi refrigeran bertekanan tinggi. Dengan naiknya tekanan tersebut maka temperatur pun akan mengalami kenaikan. Proses 1-2s merupakan kompresi secara isentropis dan 1-2 merupakan kompresi secara aktual.

❖ Proses Kondensasi (2s-3 dan 2-3)

Proses kondensasi merupakan proses pelepasan kalor dari refrigeran yang mengalir di dalam sistem ke lingkungan. Selama proses tersebut berlangsung maka akan terjadi perubahan fasa refrigeran dari gas menjadi cair.



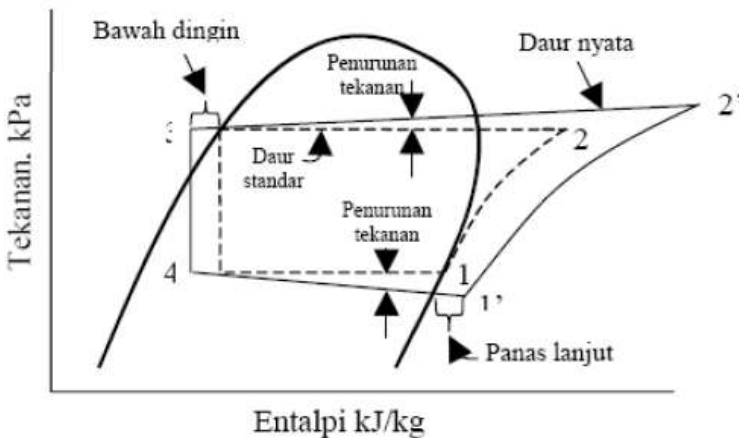
❖ Proses Ekspansi (3-4)

Proses ekspansi berarti adanya proses penurunan tekanan refrigeran dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Refrigeran tersebut berasal dari kondensor yang akan mengalir ke evaporator namun terlebih dahulu melewati alat ekspansi.

❖ Proses Evaporasi (4-1)

Proses evaporasi merupakan proses penguapan refrigeran kembali dari refrigeran dengan fasa cair bertekanan dan bertemperatur rendah menjadi uap yang kemudian akan dikompresi kembali oleh kompresor. Perubahan fasa yang terjadi diakibatkan oleh adanya penyerapan kalor dari produk yang didinginkan oleh refrigeran.

## 2.2.2 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Aktual



Gambar 2.6 Diagram P-h Siklus Refrigerasi Aktual

(Sumber: *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara Edisi Kedua*, F.J. Stoecker, 1982)

Pada dasarnya konsep Sistem Refrigerasi Kompresi Uap ideal dan aktual memiliki proses berulang (siklus) yang sama



yaitu proses kompresi, kondensasi, ekspansi dan evaporasi. Perbedaan yang timbul antara keduanya adalah adanya perubahan tekanan pada kondensor dan evaporator sehingga terjadi penurunan performa dari sistem tersebut. Pada kondensor tekanan akan mengalami penurunan seiring dengan terjadinya proses kondensasi sehingga menyebabkan timbulnya refrigeran dengan fasa cair lanjut (*subcooled*). Sementara pada evaporator tekanan yang mengalami penurunan akan mengakibatkan panas lanjut (*superheated*). Penurunan dari performa sistem yang sering disebut dengan COP (*Coefficient Of Performance*) terjadi karena adanya penurunan tekanan pada kedua *heat exchanger* (kondensor dan evaporator) sehingga mengakibatkan kerja kompresor menjadi lebih berat karena memerlukan banyak daya untuk proses kompresi.

### **2.3 Zat Pendingin (*Refrigerant*)**

Ada beberapa macam jenis refrigeran yang ada di pasaran baik masih dipakai atau pun sudah dilarang dipakai. Di antaranya adalah sebagai berikut.

#### **Senyawa Halokarbon**

Refrigeran senyawa halokarbon adalah refrigeran yang mengandung satu atau lebih senyawa halogen yaitu *clourin*, *flourin*, *bromin*. Pada dasarnya refrigeran ini memiliki turunan dengan gugus yang berbeda-beda seperti gugus metana dan gugus etana. Dari kedua gugus tersebut maka didapatkan refrigeran CFC (*Cloroflourocarbon*), HFC (*Hydroflorocarbon*), dan HCFC (*Hydrocloroflourocarbon*). Refrigeran tersebut memiliki unsur *clourin* yang berarti dapat menyebabkan kerusakan pada ozon karena memiliki ODP (*Ozone Depletion Potential*). Hal tersebut dikarenakan Cl yang terdapat pada Refrigeran akan terus mengikat ozon. Sementara *Flourin* akan mengakibatkan pemanasan global (*global warming*) karena memiliki GWP (*Global Warming Potential*) yang tinggi.



## ➤ Refrigeran Alami

Refrigeran alami adalah refrigeran yang berasal dari alam yang tidak sama sekali memiliki dampak negatif bagi lingkungan. Refrigeran tersebut adalah seperti karbondioksida, amonia, dan udara bebas.

## ➤ Refrigeran *Hydrocarbon*

Berikut adalah tabel perbandingan salah satu jenis refrigeran sintesis (halokarbon) dengan hidrokarbon.

Tabel 2.1 Perbandingan *Properties* MC-22 dan R-22

NO	PARAMETER	MC-22	R-22
1	Panas Jenis Cairan Jenuh pd 37,8o C, Kj/Kg	2909	1325
2	Panas Jenis Uap Jenuh pd 37,8o C, Kj/Kg	2238	0,9736
3	Konduktivitas Termal Cairan Jenuh pd 37,8o C, w/m	0,0868	0,0778
4	Konduktivitas Termal Uap Jenuh pd 37,8o C, w/m	0,0211	0,0128
5	Kerapatan Cairan Jenuh pd 37,8o C, (kg/m <sup>3</sup> )	471,30	1.138,0
6	Kerapatan Cairan Jenuh pd 37,8o C, (kg/m <sup>3</sup> )	28,53	62,46
7	Kerapatan Uap Jenuh pd 37,8o C, (kg/m <sup>3</sup> )	2412	4705
8	Viskositas Cairan Jenuh pd 37,8o C, (uPa-s)	84,58	143,10
9	Viskositas Uap Jenuh pd 37,8o C, (uPa-s)	9263	13,39

Refrigeran ini bersifat alami karena dapat “didaur ulang” oleh lingkungan sekitar tanpa ada kerusakan yang berdampak besar. Kerusakan dalam bentuk ODP dan GWP dari refrigeran ini sangat kecil sehingga dapat diabaikan namun resiko dari refrigeran ini adalah mudah terbakar dibandingkan refrigeran yang lain sehingga tingkat *safety* dalam penggunaan refrigeran ini harus diperhatikan dengan seksama.

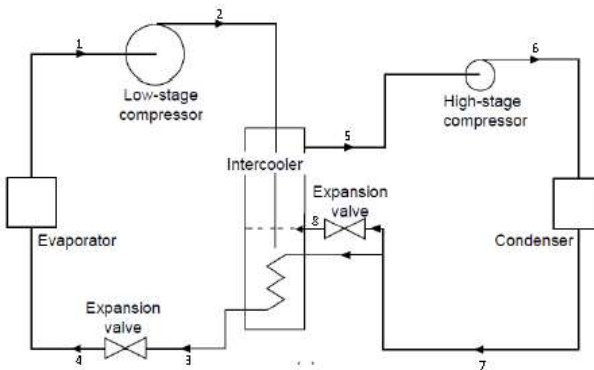
## 2.4 Sistem Refrigerasi *Cascade*

Sistem Refrigerasi *Cascade* merupakan salah satu *improvement* dari teknologi Sistem Refrigerasi Kompresi Uap. Proses yang terjadi pada sistem refrigerasi tersebut pun identik hanya saja sistem tersebut menggunakan kombinasi dari dua Sistem Refrigerasi Kompresi Uap. Kedua sistem tersebut



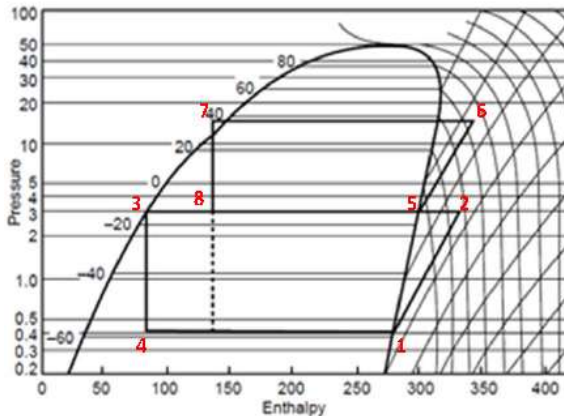
difungsikan untuk pencapaian temperatur yang sangat rendah seperti penggunaan *cold storage* untuk daging (*carcas*).

Sistem tersebut dibagi menjadi dua stage yaitu *High Stage* dan *Low Stage*, dimana kalor yang dilepas oleh kondensor pada sisi rendah (*Low Stage*) akan diserap oleh evaporator pada sisi tinggi (*High Stage*). Secara teori, sistem ini digunakan guna menghemat daya *input* (*supply power*) kompresor dan mendapatkan kapasitas refrigerasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan Sistem Refrigerasi Kompresi Uap biasa.



Gambar 2.7 Rangkaian Komponen Sistem Refrigerasi *Cascade*  
(Sumber :A. R. Trott and T. Welch, *Refrigeration and Air-Conditioning 3rd* , 2000)

Pada gambar 2.7 di atas ditunjukkan suatu skema dari Sistem Refrigerasi *Cascade*, dimana setiap komponen memiliki jumlah *double* dan membaginya menjadi dua *stage* (*high* dan *low*). Pada sistem tersebut menggunakan *intercooler* sebagai *Cascade*-nya dimana *intercooler* tersebut memiliki fungsi yang sama seperti *heat exchanger* pada umumnya.



Gambar 2.8 Penggambaran Konsep Siklus Refrigerasi *Cascade* pada Diagram P-h

(Sumber :A. R. Trott and T. Welch, *Refrigeration and Air-Conditioning 3rd* , 2000)

Gambar 2.15 di atas merupakan ilustrasi jika Sistem Refrigerasi *Cascade* dianalisis dalam satu diagram P-h (kenyataannya tidak bisa). Dari gambar diagram P-h di atas dapat diketahui bahwa sistem refrigerasi tersebut merupakan gabungan dari dua sistem refrigerasi kompresi uap. 1-2- 3-4 merupakan sistem refrigerasi *Low Stage* sementara 5-6-7-8 merupakan sistem refrigerasi *High Stage*. Dalam analisis secara aktualnya, diagram P-h yang digunakan pada kedua sistem berbeda sesuai dengan refrigeran yang digunakan. Beberapa aplikasi dari Sistem refrigerasi *Cascade* adalah pencairan pada industri minyak, pencairan pada industri gas, Industri pembuatan es kering, proses pembekuan produk, dll.

Keuntungan dari sistem refrigerasi *Cascade* di antaranya adalah sebagai berikut.

1. Dari segi *safety*, sistem ini lebih aman karena refrigeran yang digunakan merupakan refrigeran yang berbeda antara refrigeran pada sisi tinggi dan refrigeran pada sisi tengah sehingga dapat

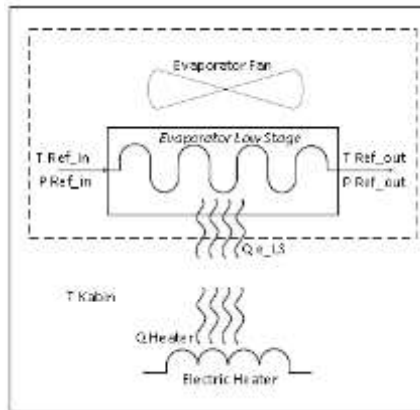


- ditentukan tekanan kerja yang optimal sesuai *properties* dari masing-masing refrigeran. Selain itu tekanan sistem yang terlalu tinggi dan terlalu rendah dapat dihindari.
2. Dari segi daya, sistem ini lebih hemat karena dapat menghemat konsumsi daya yang dikonsumsi oleh kompresor secara keseluruhan walau pun kompresor yang digunakan lebih dari satu.
  3. Perpindahan oli pelumas dari kompresor dapat dijaga dan tidak akan tercampur karena sistem kerja dari sistem ini terpisah antara *High Stage* dan *Low Stage*.
  4. Pencapaian temperatur yang sangat rendah dapat dicapai karena panas yang dibuang (*heat rejected*) oleh kondensor pada sisi rendah akan diserap oleh evaporator pada sisi tinggi sehingga pembuangan kalor pada sisi rendah akan lebih optimal.

### **Persamaan Mencari Laju Aliran Massa Refrigeran pada Tiap Sistem dengan Perubahan Beban (*Electric Heater*)**

Perhitungan laju aliran massa (*mass flow rate*) untuk sistem *Low Stage* didasarkan pada kesetimbangan energi pada evaporator *Low Stage* dengan besarnya energi yang dikeluarkan oleh *electric heater*, yaitu dengan membagi besarnya kalor yang dihasilkan oleh *electric heater* (beban) dengan selisih entalpi masuk dan keluar evaporator *Low Stage*. Berubahnya nilai beban akan mempengaruhi nilai dari laju aliran massa refrigeran di dalam sistem *Low Stage*. Sedangkan untuk menghitung besarnya laju aliran massa untuk sistem *High Stage* didasarkan pada kesetimbangan energi pada *Plate Heat Exchanger* antara sistem *High Stage* dan sistem *Low Stage* yaitu dengan membagi besarnya kalor yang dilepas oleh refrigeran yang melalui kondensor *Low Stage* dengan selisih entalpi masuk dan keluar evaporator *High Stage*. Gambar 2.16 berikut adalah skema dari kondisi kabin sistem.





Gambar 2.9 Skema dan Titik-titik Pengukuran pada Kabin

Keterangan:

$Q_{heater}$  = Kalor yang dikeluarkan oleh *electric heater*/beban, kW

$T_{ref\_in}$  = Temperatur masuk evaporator, °C

$P_{ref\_in}$  = Tekanan masuk evaporator, Psi

$T_{ref\_out}$  = Temperatur keluar evaporator, °C

$P_{ref\_out}$  = Tekanan keluar evaporator, Psi

$Q_{e\_LS}$  = Kalor yang diserap oleh evaporator *Low Stage*, kW

Dari skema dan titik-titik pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 2.16, maka diasumsikan adanya kesetimbangan energi antara kalor yang dihasilkan oleh *electric heater* dengan kalor yang diserap oleh evaporator. Berikut adalah persamaan yang digunakan.

$$A_i = \sum (P \times l)_i$$

$$\frac{1}{U_i} = \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3} + \dots + \frac{x_i}{k_i} + \frac{1}{h}$$

$$Q_{kabin} = U_i \times A_i \times (T_L - T_k)$$

$$Q_{e\_LS} = Q_{heater} + Q_{kabin}$$



$$\begin{aligned} \dot{m}_{ref\_LS} \times (h_1 - h_4) &= Q_{heater} + Q_{kabin} \\ \dot{m}_{ref\_LS} &= \frac{Q_{heater} + Q_{kabin}}{(h_1 + h_4)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

dimana:

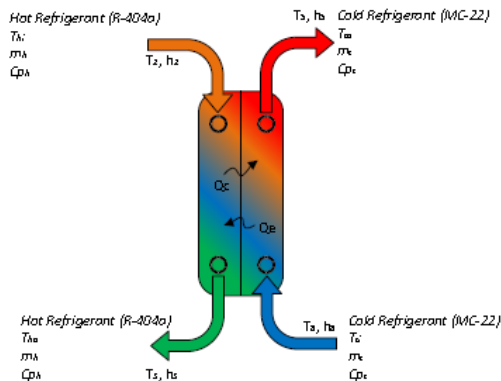
$\dot{m}_{ref\_LS}$  = Laju aliran massa refrigeran melewati kondensor  
*Low Stage*, kg/s

$h_1 - h_4$  = Selisih entalpi refrigeran pada *outlet* dan *inlet*  
evaporator, kJ/kg

$U_i$  = Overall Heat Coefficient,  $W/m^2K$

$A_i$  = Luas sisi-sisi kabin,  $m^2$

Sementara untuk mencari besarnya nilai dari laju aliran refrigeran yang mengalir pada sistem *Low Stage*, maka digunakan persamaan kesetimbangan energi pada *Plate Heat Exchanger* yaitu antara sistem *High Stage* dan sistem *Low Stage* dengan asumsi besarnya kalor yang dilepas oleh kondensor *Low Stage* sama dengan besarnya kalor yang diterima oleh evaporator *High Stage*. Besarnya kalor yang diserap oleh evaporator *Low Stage* akan sebanding dengan bukaan TXV yang terpasang pada sistem yang dipengaruhi besarnya beban.



Gambar 2.10 Skema Arah Aliran dan Titik-titik Pengukuran pada  
*Intermediate*



Pada gambar 2.17 ditunjukkan arah aliran dari refrigeran dimana pada PHE tersebut refrigeran mengalir secara berlawanan (*Counter Flow*) antara refrigeran dari sistem *High Stage* dan *Low Stage*. Untuk menghitung besarnya laju aliran massa dapat dilakukan dengan membagi besarnya kalor yang diserap refrigeran yang melalui evaporator *High Stage* dengan selisih entalpi masuk dan keluar kondensor *Low Stage*.

Pada gambar 2.16 di atas ditunjukkan pula data pengukuran yang dapat diperoleh, maka untuk mencari besarnya laju aliran massa pada sistem *Low Stage* dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$Q_{e\_HS} = Q_{c\_LS}$$

$$\dot{m}_{ref\_HS} \times (h_5 - h_8) = \dot{m}_{ref\_LS} \times (h_2 - h_3)$$

$$\dot{m}_{ref\_HS} = \frac{\dot{m}_{ref\_LS} \times (h_2 - h_3)}{(h_5 - h_8)} \quad (2.2)$$

dimana:

$Q_{e\_HS}$  = Panas yang diserap evaporator *High Stage*, kW

$Q_{c\_LS}$  = Panas yang dilepaskan kondensor *Low Stage*, kW

$\dot{m}_{ref\_HS}$  = Laju aliran massa refrigeran melewati evaporator *High Stage*, kg/s

$\dot{m}_{ref\_LS}$  = Laju aliran massa refrigeran melewati kondensor *Low Stage*, kg/s

$h_2$  = Entalpi refrigeran masuk kondensor *Low Stage*, kJ/kg

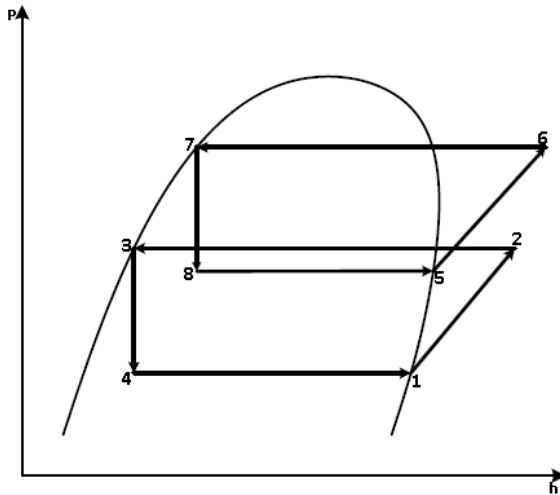
$h_3$  = Entalpi refrigeran keluar kondensor *Low Stage*, kJ/kg

$h_8$  = Entalpi refrigeran masuk evaporator *High Stage*, kJ/kg

$h_5$  = Entalpi refrigeran keluar evaporator *High Stage*, kJ/kg



## Persamaan yang Digunakan pada Sistem Refrigerasi *Cascade*



Gambar 2.11 Skema Diagram P-h Sistem Refrigerasi *Cascade*

### a) Kerja Nyata Kompresor

$$W_{ref\_HS} = \dot{m}_{ref\_HS} (h_6 - h_5)$$

$$W_{ref\_LS} = \dot{m}_{ref\_LS} (h_2 - h_1) \quad (2.3)$$

dimana:

$W_{ref\_HS}$  = Kerja nyata kompresor untuk *High Stage*, kW  
 $\dot{m}_{ref\_HS}$  = Laju aliran massa refrigeran Muscicol-22, kg/s  
 $h_6 - h_5$  = Selisih entalpi refrigeran pada *discharge* dan *suction* kompresor, kJ/kg

$W_{ref\_LS}$  = Kerja nyata kompresor untuk *Low Stage*, kW  
 $\dot{m}_{ref\_LS}$  = Laju aliran massa refrigeran R-404A, kg/s  
 $h_2 - h_1$  = Selisih entalpi refrigeran pada *discharge* dan *suction* kompresor, kJ/kg



b) Kalor yang Dilepas ke Lingkungan (*Surrounded*) untuk *High Stage*

Kalor yang dilepas kondensor adalah kalor yang dilepas dari refrigeran yang mengalir melewati kondensor, maka kalor tersebut (*heat rejected*) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q_c = \dot{m}_{ref\_HS}(h_6 - h_7) \quad (2.4)$$

dimana:

$Q_c$  = Laju pelepasan kalor kondensor di *High Stage/Low Stage*, kW

$\dot{m}_{ref\_HS}$  = Laju aliran massa refrigeran Musicool-22, kg/s

$h_6 - h_7$  = Selisih entalpi refrigeran pada *inlet* dan *outlet* kondensor, kJ/kg

c) Kapasitas Pendinginan pada Evaporator untuk *Low Stage*

Kapasitas pendinginan (*cooling load*) di evaporator adalah jumlah kalor yang diserap oleh refrigeran yang mengalir melewati evaporator. Berikut adalah persaaan yang dapat digunakan untuk menghitung besarnya *cooling load* pada evaporator.

$$Q_e = \dot{m}_{ref\_LS}(h_1 - h_4) \quad (2.5)$$

dimana :

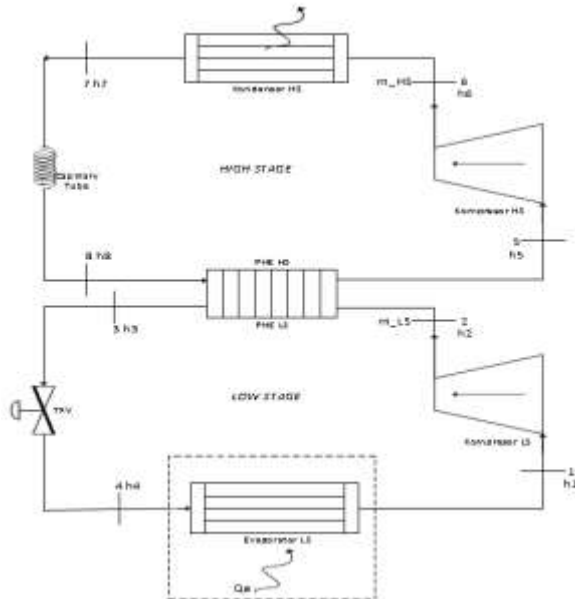
$Q_e$  = Kapasitas pendinginan di *High Stage/Low Stage*, kW

$\dot{m}_{ref\_LS}$  = Laju aliran massa refrigeran R-404A, kg/s

$h_1 - h_4$  = Selisih entalpi refrigeran pada *outlet* dan *inlet* evaporator, kJ/kg

d) COP Sistem Refrigerasi *Cascade*

COP pada Sistem Refrigerasi *Cascade* dapat dilakukan dengan membagi kapasitas pendinginan pada evaporator *Low Stage* (2.5) dengan jumlah kerja nyata kompresor *High Stage* dan *Low Stage* (2.3). Berikut adalah skema pengukuran data yang untuk menghitung COP Sistem Refrigerasi *Cascade*.



Gambar 2.12 Skema Sistem Refrigerasi Cascade

$$COP_{cascade} = \frac{Q_{e\_LS}}{W_{ref\_HS} + W_{ref\_LS}}$$

$$COP_{cascade} = \frac{m_{ref\_LS}(h_2 - h_1)}{(m_{ref\_HS}(h_6 - h_5)) + (m_{ref\_LS}(h_2 - h_1))} \quad (2.6)$$

dimana:

- $COP_{cascade}$  = COP sistem refrigerasi Cascade
- $Q_{e\_LS}$  = Kapasitas refrigerasi di Low Stage, kW
- $W_{ref\_HS}$  = Kerja nyata kompresordi High Stage, kW
- $W_{ref\_LS}$  = Kerja nyata kompresordi Low Stage, kW
- $m_{ref\_LS}$  = Laju aliran massa refrigerandi Low Stage, kg/s
- $m_{ref\_HS}$  = Laju aliran massa refrigerandi High Stage, kg/s
- $h_1$  = Entalpi refrigeran masuk kompresor di Low Stage, kJ/kg
- $h_2$  = Entalpi refrigeran keluar kompresor di Low Stage, kJ/kg



- $h_4$  = Entalpi refrigeran masuk evaporator di *Low Stage*, kJ/kg  
 $h_5$  = Entalpi refrigeran masuk kompresor di *High Stage*, kJ/kg  
 $h_6$  = Entalpi refrigeran keluar kompresor di *High Stage*, kJ/kg

e) Rasio Pelepasan Kalor (HRR) Sistem Refrigerasi *Cascade*

Laju perpindahan panas pada kondensor jika kaitannya dengan kapasitas refrigerasi dinyatakan sebagai “*Rasio Pelepasan Kalor*” atau *Heat Rejection Rasio (HRR)* dapat dinyatakan dengan membagi besarnya kalor yang dilepaskan kondensor (2.6) dibagi dengan besarnya kalor yang diserap oleh refrigeran (2.7) sebagai berikut.

$$HRR = \frac{Q_c}{Q_e} = \frac{\text{laju pelepasan kalor di kondensor}}{\text{laju penyerapan kalor di evaporator}}$$

$$HRR = \frac{Q_c}{Q_e} = \frac{m_{ref\_HS}(h_6 - h_7)_{sor}}{m_{ref\_LS}(h_1 - h_4)} \quad (2.7)$$

dimana :

- $Q_c$  = Laju pelepasan kalor kondensor di *High Stage*, kW  
 $Q_e$  = Laju penyerapan kalor evaporator di *Low Stage*, kW  
 $h_6 - h_7$  = Selisih entalpi refrigeran pada *inlet* dan *outlet* kondensor, kJ/kg  
 $h_1 - h_4$  = Selisih entalpi refrigeran pada *outlet* dan *inlet* evaporator, kJ/kg

## 2.5 Intermediate

*Intermediate* merupakan sebutan untuk *heat exchanger* yang digunakan pada Sistem Refrigerasi *Cascade* yang menghubungkan antara evaporator *High Stage* dengan kondensor *Low Stage*. *Intermediate* yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis *Plate Heat Exchanger (PHE)* dengan jenis aliran *counter flow* dimana pada *intermediate* tersebut terdapat berlapis-lapis piringan (*plate*) yang dapat menukarkan kalor dengan kemampuan yang sangat baik. Kemampuan suatu *heat exchanger*



tersebut akan menunjukkan performa dari sistem yang dinamakan dengan *Effectiveness*. Berikut adalah gambar model dari *Heat Exchanger* yang digunakan.



Gambar 2.13 PHE yang Digunakan  
(Sumber : SWAP, a Dover Compan's Catalog)

Sementara untuk menghitung nilai *Effectiveness* dari PHE tersebut, berikut persamaan-persamaan yang dapat digunakan.

Untuk nilai  $C_c < C_h$ , maka,

$$q_{max} = C_c(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.8)$$

Untuk nilai  $C_h < C_c$ , maka,

$$q_{max} = C_h(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.9)$$

dimana untuk nilai  $C_c = \dot{m}_c . C_{pc}$  dan  $C_h = \dot{m}_h . C_{ph}$

Dari persamaan (2.12) dan (2.13) dapat disimpulkan bahwa nilai  $q_{max}$  dapat diperoleh dengan persamaan berikut.

$$q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.10)$$

Nilai  $C_{min}$  adalah sama dengan nilai  $C_c$  atau  $C_h$  (diambil yang terkecil).

*Effectiveness* ( $\epsilon$ ) dari *heat exchanger* dapat diperoleh dengan membandingkan antara nilai perpindahan panas aktual dengan nilai perpindahan panas maksimum.

$$\epsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (2.11)$$

$$\epsilon = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.12)$$





atau

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2.13)$$

dimana :

$\varepsilon$  = *Effectiveness heat exchanger*

$C_h$  = Kapasitas panas untuk fluida panas, kJ/s.K

$C_c$  = Kapasitas panas untuk fluida dingin, kJ/s.K

$C_{min}$  = Kapasitas panas minimum (terkecil) dari kedua fluida panas maupun dingin, kJ/s.

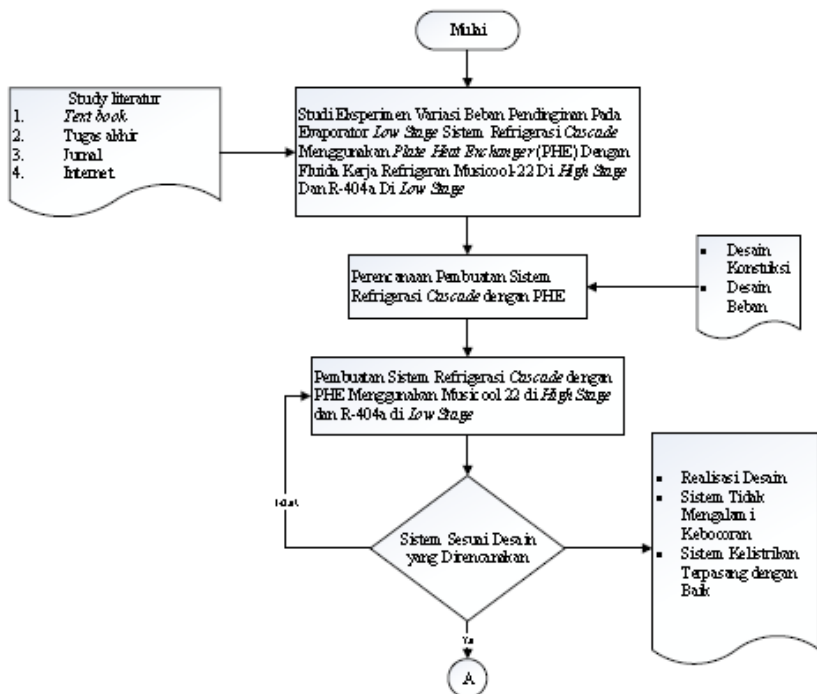


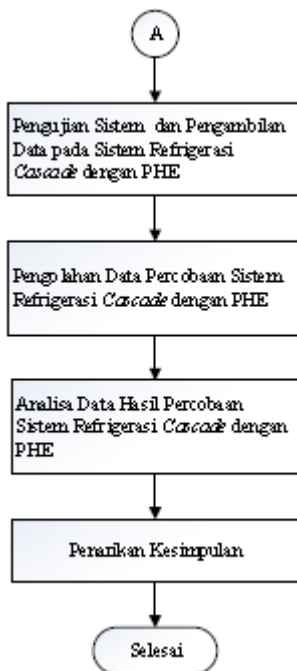
## BAB III METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui performa dari Sistem Refrigerasi *Cascade* dengan *Plate Heat Exchanger* (PHE).

### 3.1. Diagram Alir (Flowchart) Penelitian

Pada Diagram Alir (*Flowchart*) di bawah ini akan dijelaskan tentang urutan-urutan yang akan dilakukan dalam penelitian ini.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.2. Pengujian Performa Sistem Refrigerasi *Cascade*

Pengujian Sistem Refrigerasi *Cascade* ini menggunakan fluida kerja Muscicol-22 pada sisi tekanan tinggi (*High Stage*) dan R-404a pada sisi tekanan rendah (*Low Stage*). *High* dan *Low Stage* digabungkan dengan bantuan *intermediate* jenis *plate* atau *Plate Heat Exchanger* (PHE) serta pemberian variasi beban pada evaporator *Low Stage*.



### **3.2.1. Peralatan yang Digunakan**

Dalam eksperimen ini, berikut adalah peralatan yang digunakan guna menyelesaikan eksperimen.

1. *Pressure Gauge*, yaitu alat pengukur tekanan yang akan diukur di setiap titik-titik pengukuran yang telah ditentukan baik pada sistem *High Stage* atau pun *Low Stage*.
2. *Thermocouple*, yaitu alat ukur yang digunakan untuk mengukur temperatur pada titik-titik pengukuran yang telah ditentukan pada sistem *High* dan *Low Stage*.
3. *Thermometer Selector*, yaitu alat yang digunakan untuk menentukan menentukan termokopel yang bekerja pada sistem.
4. *Digital Thermometer*, yaitu alat yang digunakan untuk menampilkan temperature yang diukur pada titik pengukuran tertentu oleh termokopel.
5. *Voltmeter dan Amperemeter*, yaitu alat ukur yang berfungsi mengukur tegangan dan arus listrik yang mengalir pada sistem.
6. *Volt Regulator*, yaitu alat yang digunakan untuk mengatur arus dan tegangan listrik pada saat *electric heater* dihidupkan.





Ampere : 2 - 3,6 Ampere  
Daya : 1 PK  
Refrigeran : R-22  
Lubricant : Alkylbenzene

**Untuk Low Stage**

Jenis/Merk : *Hermetic Reciprocating/Tecumseh*  
Kode : CAJ 2446.Z  
Voltage/Hz : 220 – 240 V/50 Hz  
Ampere : 3,5 – 4,8 Ampere  
Daya : 1 PK  
Refrigeran : R-404A  
Lubricant : Alkylbenzene



(a)



(b)

Gambar 3.3 (a) Kompresor *High Stage*, (b) Kompresor *Low Stage*

**2. Kondensor *High Stage***

Jenis : *Tube and fins air cooled condenser*  
Tipe : *Compact heat exchanger*  
Material : Pipa tembaga  
Fan : 400 rpm-0,5 Ampere  
Dimensi : Panjang 41 cm, lebar 7 cm,  
dan tinggi 34 cm



Gambar 3.4 Kondensor *High Stage*

### 3. *Intermediate*

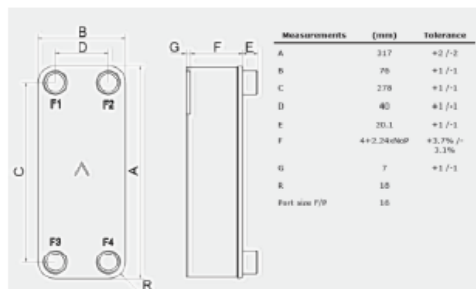
Tipe : *Brazed Plate Heat Exchanger*

Material : *AISI 316*

Braze : *Pure Copper*



Gambar 3.5 *Plate Heat Exchanger*



Gambar 3.6 Dimensi *Plate Heat Exchanger*



#### 4. Evaporator *Low Stage*

Jenis : *Finned Tube* Evaporator  
Tipe : *Compact heat exchanger*  
Fan : 400 rpm-0,5 Ampere  
Dimensi : Panjang 34 cm, lebar 4 cm, dan tinggi 26 cm



Gambar 3.7 Evaporator *Low Stage*

#### 5. Alat Ekspansi

##### Untuk *High Stage*

Tipe : Pipa kapiler  
Panjang : 1,25 m  
Diameter dalam : 3 mm

##### Untuk *Low Stage*

Tipe : TXV  
Merk : Danffos



(a)



(b)

Gambar 3.8 (a) *Capillary Tube High Stage* (b) *TXV Low Stage*





## 6. *Liquid Receiver*

*Liquid Receiver* berfungsi untuk menampung refrigeran cair yang berasal dari kondensor sehingga refrigeran yang masuk ke alat ekspansi benar-benar cair sepenuhnya.

### **Untuk *High Stage***

Merk : HUB  
Tipe : *Vertical mount*  
Dimensi : Diameter 8 cm, tinggi 19 cm  
Refrigeran : R-12, R-22, R-500, R-502

### **Untuk *Low Stage***

Merk : San Xin  
Tipe : *Vertical mount*  
Dimensi : Diameter 14 cm, tinggi 22 cm



(a)



(b)

Gambar 3.9 (a) *Liquid Receiver High Stage* (b) *Liquid Receiver Low Stage*

## 7. *Filter Dryer*

*Filter dryer* merupakan alat penyaring aliran dari uap air dan partikel-partikel yang terbawa oleh refrigeran seperti serpihan logam, debu, dll.

Merk : Emerson  
Dimensi : Diameter 5,5 cm, panjang 5,5 cm



Gambar 3.10 *Filter Dryer High Stage dan Low Stage*

### 8. *Gate Valve*

*Gate Valve* merupakan katup manual yang dipasang pada *intel* dan *outlet liquid receiver* dengan tujuan mencegah keluar dan masuknya refrigeran cair yang tertampung pada *liquid receiver* selama sistem dalam kondisi tidak bekerja (*off*).

Merk : *Starmec*

Jenis : *Globe valve*



Gambar 3.11 *Gate Valve*

### 9. *Electric Heater*

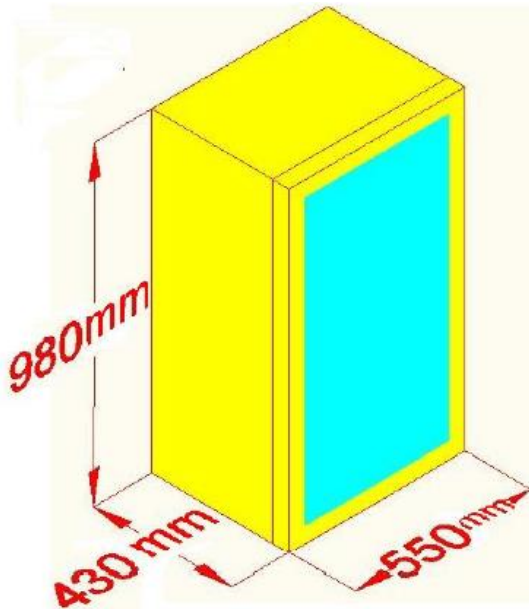
*Electric Heater* berfungsi sebagai beban pendinginan pada evaporator *Low Stage*.

Daya : 300 Watt



Gambar 3.12 *Electric Heater*

## 10. Kabin

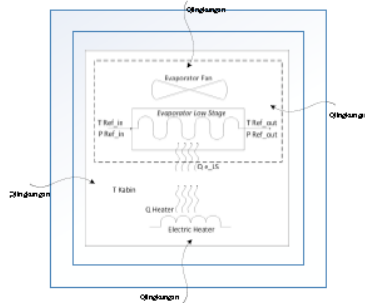


Gambar 3.13 Kabin Sistem



### 3.2.3. Rancangan Percobaan

Berikut ini adalah gambar dari rancangan percobaan yang dilakukan di evaporator *Low Stage*:



Gambar 3.14 Kabin dengan *Electric Heater*

Percobaan ini menggunakan variasi beban pada kabin dengan menggunakan *electric heater* pada kabin (*Low Stage*) Sistem Refrigerasi *Cascade*. *Electric heater* tersebut akan mengeluarkan kalor yang kemudian akan diserap oleh evaporator di dalam kabin. Dengan pembebanan yang bervariasi maka diharapkan dapat diketahui pengaruh beban tersebut terhadap performa Sistem Refrigerasi *Cascade*.

Beban yang diberikan tersebut bernilai nol (tanpa beban), 70, 140, 210, dan 300 Watt. Beban tersebut dihubungkan pada potensiometer/dimmer sehingga tegangan dan arus yang dapat diatur sesuai beban yang dibutuhkan. Dengan pembebanan berupa variasi beban *heater* tersebut data yang didapatkan berupa temperatur kabin, temperatur keluar dan masuk evaporator, tekanan keluar dan masuk evaporator dengan asumsi kondisi lingkungan konstan.

### 3.2.4. Prosedur Pengujian Performa Sistem Refrigerasi *Cascade*

Sistem Refrigerasi *Cascade* dengan *Plate Heat Exchanger* ini menggunakan Musicool-22 pada *High Stage* dan R-404a pada *Low Stage*. Pengujian dilakukan dengan



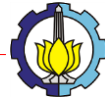
memberikan beban yang bervariasi pada kabin dengan memasang tiga *electric heater* yang dapat diatur dengan menggunakan potensiometer/dimmer sehingga kalor yang dihasilkan oleh *electric heater* akan diserap oleh evaporator *Low Stage*. Pengambilan data dilakukan setelah Sistem Refrigerasi *Cascade* mengalami kondisi tunak (*steady state*) baik di sistem *High Stage* atau pun sistem *Low Stage*. Kondisi *steady state* tersebut menunjukkan bahwa kalor yang dihasilkan oleh *electric heater* telah diserap secara menyeluruh oleh evaporator *Low Stage*. Untuk dapat mengetahui performa Sistem Refrigerasi *Cascade* tersebut maka pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali setiap 5 menit dengan pembebanan yang berbeda.

Prosedur dalam pengujian ini adalah sebagai berikut.

### 1. Langkah Persiapan

Berikut ini adalah langkah-langkah persiapan yang dilakukan saat melakukan eksperimen.

- Memastikan Sistem Refrigerasi *Cascade* berada pada kondisi baik, bersih, dan berada pada posisi yang mudah dijangkau.
- Memastikan semua kondisi kelistrikan dalam keadaan siap.
- Memastikan semua *gate valve* terbuka penuh.
- Mengecek kondisi setiap alat ukur seperti *pressure gauge*, termokopel, dll berfungsi dengan baik.
- Melakukan tes kebocoran dengan mengisikan nitrogen pada sistem. Jika terjadi kebocoran (jarum *pressure gauge* turun) maka cek dengan menggunakan air sabun.
- Mengeluarkan nitrogen jika sistem tidak mengalami kebocoran (jarum *pressure gauge* tidak turun) dan kemudian melakukan pemvakuman dengan menggunakan pompa vakum sehingga uap air dan sisa nitrogen yang ada di dalam sistem benar-benar bersih.
- Mengisi refrigeran *Musicool-22* di *High Stage* dan refrigeran *R-404A* di *Low Stage*.



- h. Menyiapkan *electric heater* dengan daya 0 (tanpa beban), 70, 140, 210, dan 300 Watt.
- i. Memastikan kabin dalam kondisi bersih dan pipa telah diisolasi dengan isolator.

## 2. Langkah Pengujian

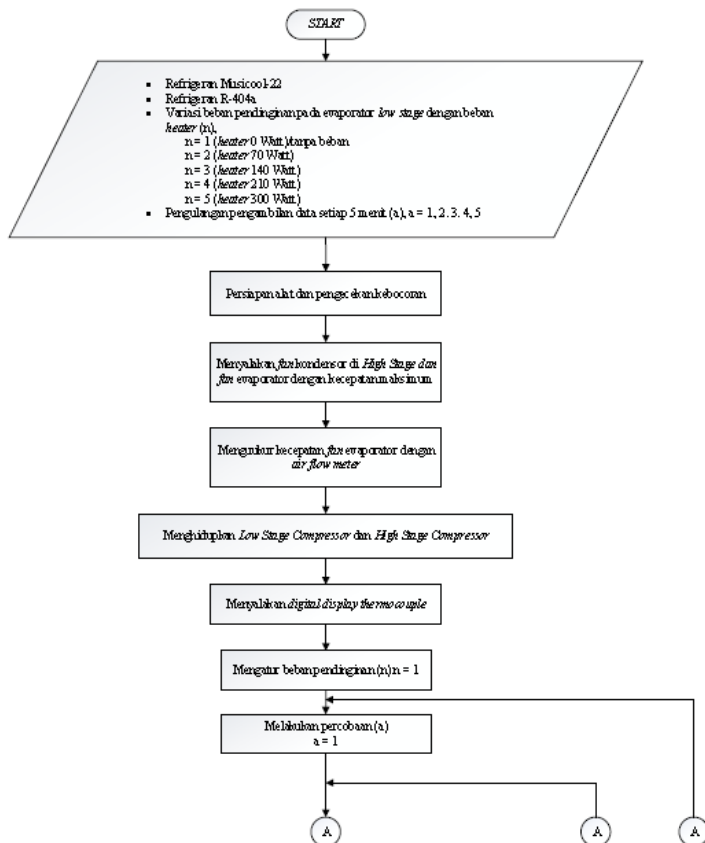
- a. Menyalakan *fan* kondensor dan set pada kecepatan maksimum.
- b. Menyalakan *fan* evaporator dan mengukur kecepatan di setiap sisi kabin.
- c. Menyalakan kompresor *Low Stage* hingga kondisi *steady*.
- d. Menyalakan kompresor *High Stage* hingga kondisi *steady*.
- e. Menyalakan *thermocouple display* dan mengamati temperatur di semua titik.
- f. Mengamati tekanan pada *pressure gauge* sampai sesuai dengan tekanan kerja sistem.
- g. Menunggu kedua sistem berjalan secara *steady*, yaitu kondisi dimana sistem berada pada kondisi tanpa ada perubahan properties terhadap perubahan waktu. Contohnya adalah temperature konstan telah tercapai.
- h. Setelah *steady* dengan perlakuan tanpa ada pembebanan (variasi pertama) berupa *electric heater* di evaporator *Low Stage*, maka catat data (data temperatur dari *digital display* maupun data tekanan dari *pressure gauge* di semua titik pengukuran, tegangan, arus listrik yang mengalir)
- i. Menunggu setiap 5 menit untuk mencatat data kembali dengan perlakuan yang sama sampai 5 kali pengambilan data.
- j. Mengatur *voltage regulator* sesuai beban yang ditetapkan (0, 70 Watt, 140 Watt, 210 Watt dan 300 Watt) kemudian lakukan pengukuran di setiap beban seperti prosedur (i) dan (j).

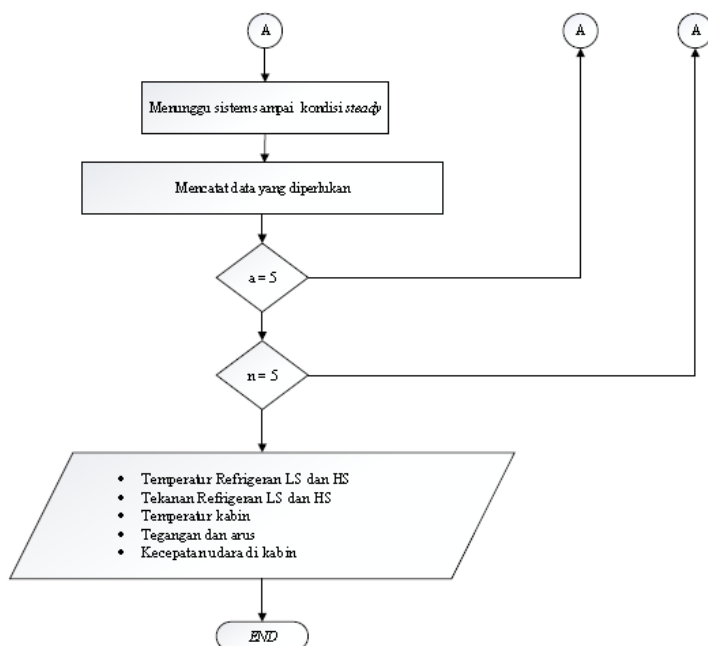


- k. Jika pengambilan data sudah selesai maka matikan *electric heater*, *Voltage Regulator*, kompresor *High Stage*, kompresor *Low Stage*, *fan* kondensor, *fan* evaporator, *digital display*, saklar utama dan cabut steker dari sumber arus listrik.

### 3.2.5. Diagram Alir (Flowchart) Pengambilan Data

Berikut ini adalah diagram alir pengambilan data untuk Sistem Refrigerasi *Cascade* dengan variasi beban pendinginan menggunakan *electric heater* di evaporator *Low Stage*.





Gambar 3.15 Diagram Alir Pengambilan Data





***(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)***



## BAB IV

### ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Hasil Percobaan

Pengambilan data pada eksperimen ini dilakukan dengan cara memvariasikan daya pada *electric heater* sebagai beban pendinginan di dalam kabin (*cooling box*) yaitu di bawah evaporator *Low Stage*. Data hasil pengujian dapat dilihat pada lembar lampiran.

#### 4.2 Contoh Perhitungan

Berdasarkan skema alat uji pada gambar 3.2, diperoleh data hasil pengujian dengan variasi beban pendinginan 0 (tanpa beban/*Electric Heater Off*). Data tersebut akan digunakan untuk contoh perhitungan dalam mengevaluasi sistem refrigerasi *cascade* sebagai berikut.

Tabel 4.1 Data Hasil Pengukuran dengan Beban Nol

Titik Pengukuran	Low Stage	High Stage
§ Temp. keluar evaporator	-23,12°C	14.36°C
§ Temp. masuk kondensor	79.08°C	80.05°C
§ Temp. keluar kondensor	-1.6°C	31.9°C
§ Temp. masuk evaporator	-38.3°C	-3.22°C
§ Tekanan keluar evaporator	1 psi	45.8 psi
§ Tekanan masuk kondensor	90 psi	190 psi
§ Tekanan keluar kondensor	89 psi	171.6 psi
§ Tekanan masuk evaporator	3 psi	45 psi
§ Arus Listrik	2.25 A	2,4 A
§ Tegangan Listrik	210 Volt	210 Volt
§ Temp. kabin	-33.3°C	
§ Temp. lingkungan	27°C	



#### 4.2.1 Perhitungan Laju Aliran Massa Refrigeran

Perhitungan laju aliran massa refrigeran untuk sistem *High Stage* didasarkan pada kesetimbangan energi pada kondensor *High Stage* seperti pada perumusan 2.1 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}Q_{e\_LS} &= Q_{\text{beban kabin}} \\ \dot{m}_{\text{ref\_LS}} \times (h_1 - h_4) &= Q_{\text{beban kabin}} \\ \dot{m}_{\text{ref\_LS}} &= \frac{Q_{\text{beban kabin}}}{(h_1 - h_4)}\end{aligned}$$

Dengan beban 0 atau *electric heater* mati, maka beban dihasilkan hanya dari sisi-sisi kabin. Berikut adalah propertis dari sisi kabin.

Tabel 4.2 *Properties Kabin (Cooling Box)*

Material	Kalor Spesifik	Tebal (mm)
<i>Zinc</i>	116	0.001
<i>Wood</i>	0.17	0.01
<i>PU</i>	0.03	0.028
<i>Glass</i>	1.05	0.003
<i>Air</i>	0.263	0.024

Dengan menghitung luasan sisi kabin dengan perumusan sebagai berikut, maka dapat dicari nilai *Overall Heat Coefficient* (U) dengan memperhitungkan fenomena konduksi pada semua sisi dan konveksi yang terjadi pada kabin namun karena nilai konveksi yang terbesar terjadi pada sisi depan atau pintu kaca kabin, maka perhitungan besarnya koefisien konveksi hanya dilakukan pada sis tersebut saja.

- Luas sisi depan bagian dalam

$$A_{\text{depan-belakang}} = (P \times l)_{\text{depan-belakang}}$$

$$A_{\text{depan-belakang}} = (0.55 \text{ m} \times 0.98 \text{ m})$$

$$A_{\text{depan-belakang}} = 0.539 \text{ m}^2$$



- **Cabin Resistances**

$$\frac{1}{U_{dinding}} = \frac{x_z}{k_z} + \frac{x_w}{k_w} + \frac{x_{pu}}{k_{pu}} + \frac{x_w}{k_w} + \frac{x_z}{k_z}$$

$$\frac{1}{U_{pintu kaca}} = \frac{x_g}{k_g} + \frac{x_a}{k_a} + \frac{x_g}{k_g} + \frac{1}{h_i}$$

Dari persamaan di atas, maka perlu dicari nilai koefisien konveksi (h) terlebih dahulu dengan memanfaatkan teori perpindahan panas perpindahan panas secara konveksi eksternal pada *plate* datar. Kabin dengan kondisi tertentu akan memberikan nilai Temperatur (T), Kecepatan udara (V), koefisien konduksi (k), volume spesifik (v) dan Prandlt Number (Pr) terlebih dahulu. Berikut adalah perhitungan untuk mendapatkan nilai h.

1. **Reynolds Number**

$$Re_{x,i} = \frac{u_{\infty} L}{v}$$

2. **Nusselt Number**

$$Nu_{x,i} = 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad Pr \geq 0.6$$

3. **Koefisien Konveksi, h**

$$h = \frac{Nu_{x,i} k}{x_i}$$

Di bawah ini adalah tabel perhitungan nilai *Overall Heat Coefficient* kabin pada beban 0.



Tabel 4.3 *Overall Heat Coefficient* Kabin pada Beban 0

Parameter	Unit	Atas
Reynolds		96755.14
Nusselt		185.61
Prandlt		0.72
k	$W/mK \times 10^{-3}$	21.46
Voleume spesifik	$m^2/s \times 10^{-6}$	10.67
h	$W/m^2K$	28.24
U	$W/m^2K$	7.55
Total Beban	$kW$	0.25
Luas	$m^2$	0.24

Setelah didapatkan nilai keseluruhan koefisien kalor, maka dapat dihitung beban pendinginan dari kabin dengan perumusan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}Q_{\text{beban kabin}} &= Q_{\text{dinding}} + Q_{\text{pintu kaca}} + Q_{\text{heater}} \\Q_{\text{beban kabin}} &= 107.123 \text{ W} + 247.149 \text{ W} + 0 \\Q_{\text{beban kabin}} &= 354.272 \text{ W} = 0.354272 \text{ KW}\end{aligned}$$

Hasil dari beban yang didapatkan maka dapat diketahui nilai beban dari kabin maka nilai laju aliran massa sistem *Low Stage* dapat dihitung dengan teori kesetimbangan energi. Berikut hasil perhitungan laju aliran massa refrigeran pada sistem *Low Stage* dengan kondisi electric heater off atau beban 0.

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{ref\_LS}} &= \frac{0.354272 \text{ kJ/s}}{(357.123 - 200.434) \text{ kJ/kg}} \\ \dot{m}_{\text{ref\_LS}} &= 0.002261 \text{ kg/s} = 2.261 \text{ g/s}\end{aligned}$$



Sedangkan untuk menghitung besarnya laju aliran massa untuk sistem *High Staged* digunakan pula teori kesetimbangan energi pada *cascade heat exchanger* antara sistem *High Stage* dan sistem *Low Stage* dengan menggunakan persamaan 2.2 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Q_{e\_HS} &= Q_{c\_LS} \\
 \dot{m}_{ref\_HS} \times (h_5 - h_8) &= \dot{m}_{ref\_LS} \times (h_2 - h_3) \\
 \dot{m}_{ref\_HS} &= \frac{\dot{m}_{ref\_LS} \times (h_2 - h_3)}{(h_5 - h_8)} \\
 \dot{m}_{ref\_HS} &= \frac{0.002261 \times (441.218 - 200.434) \text{ kJ/kg}}{(601.412 - 271.416) \text{ kJ/kg}} \\
 \dot{m}_{ref\_HS} &= 0.00165 \text{ kg/s} = 1.65 \text{ g/s}
 \end{aligned}$$

#### 4.2.2 Perhitungan Kerja Nyata Kompresor

Sementara itu kondisi aktual atau kondisi nyata dari kompresor dapat dihitung dengan mengalikan laju aliran massa refrigeran dengan nilai selisih entalpi keluar dan masuk kompresor seperti persamaan 2.3 sebagai berikut.

##### ▪ *Low Stage*

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{ref} &= \dot{m}_{ref\_LS} (h_2 - h_1) \\
 \dot{W}_{ref} &= 0.002261 \text{ kg/s} \times (441.218 - 357.123) \text{ kJ/kg} \\
 \dot{W}_{ref} &= 0.19014 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

##### ▪ *High Stage*

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{ref} &= \dot{m}_{ref\_HS} (h_6 - h_5) \\
 \dot{W}_{ref} &= 0.00165 \text{ kg/s} \times (709.533 - 601.412) \text{ kJ/kg} \\
 \dot{W}_{ref} &= 0.1784 \text{ kW}
 \end{aligned}$$



#### 4.2.3 Perhitungan Q Kondensor *High Stage*

Besarnya kalor yang dibuang oleh kondensor adalah hasil dari perkalian antara laju aliran massa refrigeran yang mengalir di dalam sistem refrigerasi cascade *High Stage* dengan selisih entalpi keluar dan masuk kondensor. Berikut adalah persamaan 2.4 yang digunakan untuk menghitung besarnya kalor yang harus dilepas oleh kondensor.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_c &= \dot{m}_{ref\_HS}(h_6 - h_7) \\ \dot{Q}_c &= 0.00165 \text{ kg/s} \times (709.533 - 271.416) \text{ kJ/kg} \\ \dot{Q}_c &= 0.7228 \text{ kW}\end{aligned}$$

#### 4.2.4 Perhitungan Q Evaporator *Low Stage*

Kapasitas evaporator adalah besarnya kemampuan evaporator untuk menyerap kalor dari sistem yang didinginkan/dikondisikan. Untuk mengetahui besarnya nilai kalor yang diserap oleh evaporator maka perlu dilakukan perkalian antara laju aliran massa refrigeran pada sistem *Refrigerasi Cascade Low Stage* dengan selisih entalpi dari keluaran dan masukan evaporator. Berikut adalah perumusan 2.5 yang dapat digunakan untuk menghitung kapasitas pendinginan.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_e &= \dot{m}_{ref\_LS}(h_1 - h_4) \\ \dot{Q}_e &= 0.002261 \text{ kg/s} \times (357.123 - 200.434) \text{ kJ/kg} \\ \dot{Q}_e &= 0.354 \text{ kW}\end{aligned}$$

#### 4.2.5 Perhitungan *Coefficient Of Performance (COP)* Cascade

Sistem refrigerasi memiliki nilai efisiensi yang biasa disebut dengan COP (*Coefficient of Performance*). Untuk menghitung besarnya COP dari Sistem Refrigerasi *Cascade* dapat menggunakan perbandingan antara kapasitas pendinginan pada evaporator *Low Stage* dengan masing-masing kerja kompresor



aktual di setiap *stage*-nya. Berikut adalah perumusan 2.6 yang digunakan untuk menghitung besarnya nilai COP Sistem Refrigerasi *Cascade*.

$$COP_{cascade} = \frac{\dot{Q}_{e\_LS}}{W_{ref\_HS} + W_{ref\_LS}}$$

$$COP_{cascade} = \frac{0.354 \text{ kW}}{0.19014 \text{ kW} + 0.1784 \text{ kW}}$$

$$COP_{cascade} = 0.96136$$

#### 4.2.6 Perhitungan *Heat Rejection Ratio (HRR) Cascade*

*Heat Rejection Ratio* pada Sistem Refrigerasi *Cascade* adalah perbandingan antara kalor yang dibuang oleh sistem *High Stage* dengan kalor yang diserap oleh sistem *Low Stage* sehingga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.7 sebagai berikut.

$$HRR = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_e} = \frac{\dot{m}_{ref\_HS}(h_6 - h_7)}{\dot{m}_{ref\_LS}(h_1 - h_4)}$$

$$HRR = \frac{0.7228 \text{ kW}}{0.3543 \text{ kW}}$$

$$HRR = 2.04019$$

#### 4.2.7 Perhitungan *Effectiveness Plate Heat Exchanger*

Untuk mengetahui performansi dari PHE yang digunakan maka perlu dihitung nilai *effectiveness* dari PHE tersebut. Dimana *effectiveness* dari suatu *heat exchanger* didapat dengan cara membandingkan nilai kalor aktual dan kalor maksimal pada *heat exchanger* tersebut. Berikut adalah cara perhitungan *effectiveness Plate Heat Exchanger*.

Keterangan refrigeran:

1. Fluida dingin (*cold*): *Musicool-22*
2. Fluida panas (*hot*): *R-404A*

*Properties* untuk masing-masing refrigeran tersebut didapat dari *Software Coolpack* berdasarkan data yang didapat.





- Untuk *Musicoool-22*, menggunakan *properties* R-290 karena *Musicoool-22* pada dasarnya dibuat dari *propanesama* seperti R-290 (*Hydrocarbon*)
- Untuk R-404A tetap menggunakan *properties* R-404A

Berikut adalah data temperatur dan tekanan kondensasi dan evaporasi pada Sistem Refrigerasi *Casacade*.

$$T_{\text{evap\_HS}} = 5.57^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{konden\_LS}} = 38.74^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{evap\_HS}} = 4.13 \text{ Bar}$$

$$P_{\text{konden\_LS}} = 7.168 \text{ Bar}$$

Dari data di atas, didapatkan nilai  $Cp_{LS}$  dan  $Cp_{HS}$  dengan menggunakan *software coolpack*. Berikut nilai  $Cp_{LS}$  dan  $Cp_{HS}$  yang didapat.

$$Cp_{LS} = 0.9802 \text{ kJ/kg.K}$$

$$Cp_{HS} = 1.739 \text{ kJ/kg.K}$$

Setelah didapat nilai *properties* yang dibutuhkan, berikut langkah-langkah yang dapat dilakukan untuk mendapatkan nilai *effectiveness* PHE.

1. Mencari nilai  $C_c$  dan  $C_h$

$$C_c = \dot{m}_c \cdot Cp_{HS}$$

$$C_c = 0.002261 \text{ kg/s} \times 1.739 \text{ kJ/kg.K}$$

$$C_c = 0.00287 \text{ kJ/s.K}$$

$$C_h = \dot{m}_h \cdot Cp_{HS}$$

$$C_h = 0.00165 \text{ kg/s} \times 0.9802 \text{ kJ/kg.K}$$

$$C_h = 0.00222 \text{ kJ/s.K}$$



2. Menentukan nilai  $C_{\min}$  dan  $C_{\max}$

Nilai  $C_{\min} = C_h$ , karena nilai  $C_h < C_c$   
maka  $C_h = C_{\min}$  dan  $C_c = C_{\max}$

3. Mencari nilai perpindahan kalor aktual ( $q_{\text{act}}$ ) dari *heat exchanger*

$$q_{\text{act}} = C_h (T_{h,i} - T_{h,o})$$

$$q_{\text{act}} = 0.00222 \text{ kJ/s.K} \times (352.08 - 271.4) \text{ K}$$

$$q_{\text{act}} = 0.1717 \text{ kW}$$

4. Mencari nilai perpindahan kalor maksimum ( $q_{\text{max}}$ ) dari *heat exchanger*:

$$q_{\text{max}} = C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})$$

$$q_{\text{max}} = 0.00222 \text{ kJ/s.K} \times (352.08 - 269.78) \text{ K}$$

$$q_{\text{max}} = 0.1824 \text{ kW}$$

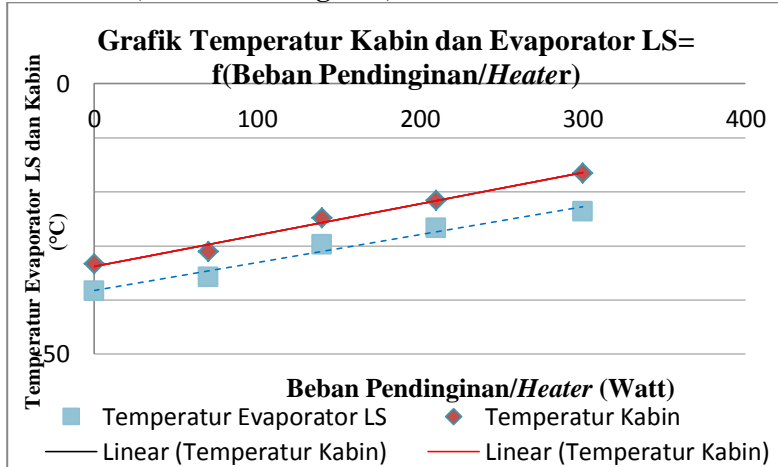
5. Mencari nilai *effectiveness* ( $\epsilon$ ) dari *heat exchanger*:

$$\epsilon = \frac{q_{\text{act}}}{q_{\text{max}}} = \frac{0.1717 \text{ kW}}{0.1824 \text{ kW}} = 0.94143$$



### 4.3 Analisis Grafik

#### 4.3.1 Grafik Temperatur Evaporator LS dan Kabin = f (Beban Pendinginan)



Gambar 4.1 Grafik Temperatur Evaporator LS dan Kabin  
= f (Beban Pendinginan)

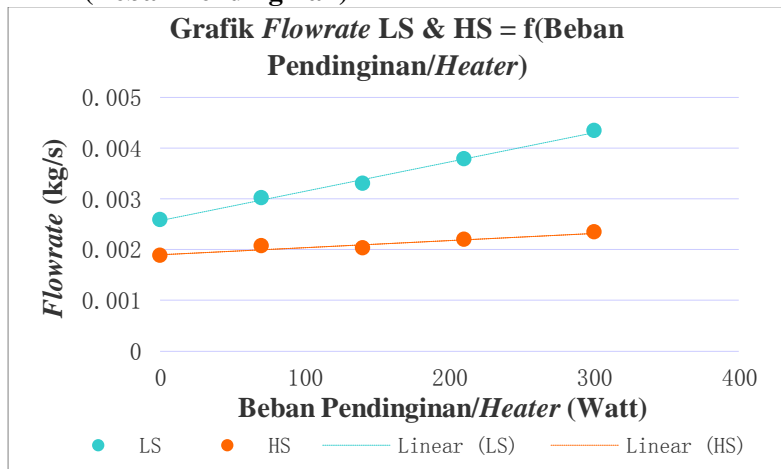
Gambar di atas merupakan gambar grafik hubungan antara temperatur evaporator LS dan kabin dengan kenaikan beban pendinginan yang diberikan oleh *electric heater*. Dari gambar grafik di atas menunjukkan bahwa *trend line* dari grafik mengalami kenaikan seiring dengan meningkatnya besar beban (*electric heater*) yang terpasang pada kabin (*cooling box*) dimana nilai temperatur evaporator *Low Stage* akan mengalami kenaikan dengan adanya penambahan nilai daya pada *electric heater*. Pada beban 0 atau *electric heater* dalam keadaan *off* temperatur evaporator *Low Stage* mencapai  $-38.3^{\circ}\text{C}$  dan terus mengalami peningkatan hingga beban dari *electric heater* mencapai nilai beban maksimal yaitu 300 Watt dimana temperatur evaporator *Low Stage* mengalami peningkatan hingga  $-23.6^{\circ}\text{C}$ . Dengan adanya kenaikan temperatur pada evaporator LS maka hal tersebut mempengaruhi nilai temperatur kabin dimana kenaikan



yang terjadi berbanding lurus dengan kenaikan temperatur pada evaporator LS. Nilai temperatur kabin terendah mencapai  $-33.3^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $-15.6^{\circ}\text{C}$ .

Naiknya nilai tempeartur evaporator *Low Stage* diakibatkan karena adanya penambahan kalor yang harus diserap oleh evaporator *Low Stage*. Penambahan kalor yang harus diserap oleh evaporator tersebut berakibat pada kenaikan temperatur keluar dan masuk evaporator *Low Stage*. Hal tersebut pun mempengaruhi dari temperatur kabin yang dapat dicapai.

#### 4.3.2 Grafik Laju Aliran Massa Refrigeran HS dan LS = f (Beban Pendinginan)



Gambar 4.2 Grafik Laju Aliran Massa Refrigeran HS dan LS = f (Beban Pendinginan)

Gambar di atas merupakan gambar grafik laju aliran massa refrigeran pada sistem *Low Stage* atau pun *High Stage*. Kedua laju aliran massa tersebut memiliki trend line cenderung mengalami kenaikan seiring dengan semakin besarnya nilai beban pendinginan yang dihasilkan oleh *electric heater*. Nilai dari laju aliran massa pada sistem *Low Stage* lebih besar dibandingkan



dengan sisi *High Stage* dan laju aliran massa *High Stage* cenderung tidak mengalami kenaikan yang signifikan dimana nilai laju aliran massa pada sistem *Low Stage* saat tidak diberikan beban (*electric heater off*) laju aliran massa refrigerannya adalah sebesar 0.002261 kg/s sementara pada sistem *High Stage* adalah 0.00165 kg/s. Keduanya mengalami peningkatan sampai dengan nilai maksimum pada beban *heater electric* yaitu 300 Watt dimana laju aliran massa untuk sistem *Low Stage* dan *High Stage* masing-masing adalah sebesar 0.004081 kg/s dan 0.002195 kg/s.

Nilai laju aliran massa tersebut didapat dengan menggunakan teori *energy balance* dimana sistem *Low Stage* memanfaatkan *energy balance* antara beban pendinginan dan nilai kapasitas pendinginan seperti yang dirumuskan berikut.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_e &= Q_{beban} \\ \dot{m}_{ref-LS}(h_1 - h_4) &= Q_{beban} \\ \dot{m}_{ref-LS} &= \frac{Q_{beban}}{(h_1 - h_4)}\end{aligned}$$

Sementara sistem *High Stage* memanfaatkan *energy balance* pada *intermediate* yaitu antara kalor yang dilepaskan oleh kondensor *Low Stage* terhadap kalor yang diserap oleh evaporator *High Stage* sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut.

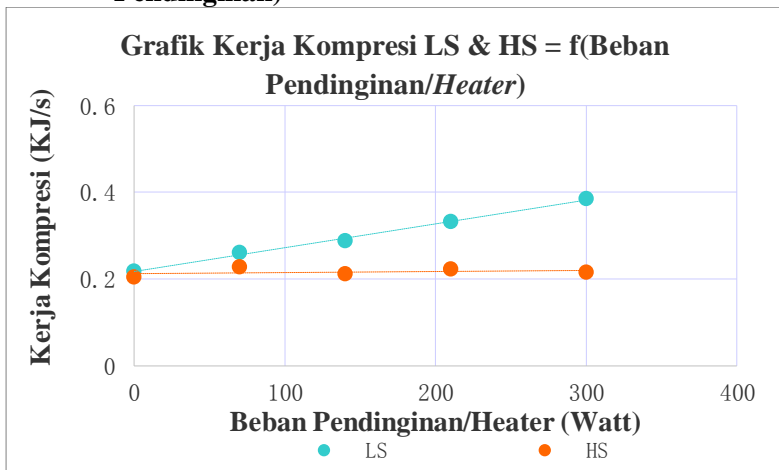
$$\begin{aligned}\dot{Q}_{c-LS} &= \dot{Q}_{e-HS} \\ \dot{m}_{ref-LS}(h_2 - h_3) &= \dot{m}_{ref-HS}(h_5 - h_8) \\ \dot{m}_{ref-HS} &= \frac{\dot{m}_{ref-LS}(h_2 - h_3)}{(h_5 - h_8)}\end{aligned}$$

Naiknya nilai kedua laju aliran massa pada sistem *Low Stage* dan *High Stage* disebabkan karena adanya penambahan beban pendinginan dari *electric heater*. Hal tersebut menyebabkan nilai kalor yang harus diserap oleh evaporator *Low Stage* akan mengalami peningkatan sehingga refrigeran yang mengalir pada evaporator akan mengalami evaporasi lebih besar sehingga nilai kapasitas pendinginan sistem *Low Stage* ( $\dot{Q}_{e-LS}$ ) pun akan meningkat. Adanya peningkatan kapasitas pendinginan



sistem *Low Stage* ( $\dot{Q}_{e_{LS}}$ ) berdampak pada nilai kalor yang harus dilepaskan oleh kondensor sistem *Low Stage* ( $\dot{Q}_{c_{LS}}$ ) sehingga mengakibatkan besarnya kalor yang dilepaskan kondensor yang harus diserap oleh evaporator *High Stage* ( $\dot{Q}_{e_{HS}}$ ) pun akan meningkat. Dengan meningkatnya  $\dot{Q}_{c_{LS}}$  dan  $\dot{Q}_{e_{HS}}$ , maka nilai laju aliran massa refrigeran sistem *High Stage* pun akan meningkat. Nilai laju aliran refrigeran sistem *Low Stage* yang lebih tinggi disebabkan karena penggunaan alat ekspansi TXV dimana alat ekspansi tersebut dapat mengatur laju aliran massa yang dibutuhkan sesuai beban pendinginan yang diberikan. Sementara nilai laju aliran massa sistem *Low Stage* bernilai lebih rendah dan cenderung tidak terlihat perubahan yang signifikan, hal tersebut dikarenakan alat ekspansi yang digunakan pada sistem *High Stage* menggunakan alat ekspansi pipa kapiler dimana alat tersebut tidak dapat mengatur laju aliran massa refrigeran secara otomatis.

#### 4.3.3 Grafik Kerja Kompresi HS dan LS = f (Beban Pendinginan)



Gambar 4.3 Grafik Kerja Kompresi HS dan LS = f (Beban Pendinginan)



Gambar di atas menunjukkan bahwa kerja kompresor pada sistem *Low Stage* dan pada sistem *High Stage* terhadap pembebanan yang diberikan pada sistem. Grafik tersebut menunjukkan *trend line* grafik yang naik untuk sistem *Low Stage* sementara sistem *High Stage* pada mengalami *trend line* yang cenderung datar. Hal tersebut dikarenakan tidak ada perubahan laju aliran massa yang signifikan dibandingkan sistem *Low Stage*. Bentuk liner dari grafik tersebut dikarenakan nilai  $W_c = \frac{1}{COP} \times Q_{evap}$  sementara nilai COP untuk *range* tertentu adalah konstan sehingga hubungan  $W_c$  terhadap  $Q_e$  (beban pendinginan) adalah linear. Nilai kerja kompresi terendah sistem *Low Stage* adalah sebesar 0.19014 kW pada beban 0 sementara nilai terendah sistem *High Stage* adalah 0.1784 kW pada beban 0 pula. Untuk nilai tertinggi pada masing-masing sistem adalah 0.6311 kW pada beban 300 Watt untuk sistem *Low Stage* dan 0.2024 kW pada beban 300 Watt untuk sistem *High Stage*.

Besarnya nilai dari kerja kompresi dari kedua sistem tersebut dipengaruhi oleh nilai laju aliran massa refrigeran dan alat ekspansi yang digunakan pada masing-masing sistem. Berikut persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai kerja kompresi.

*Low Stage*

$$\dot{W}_{ref} = \dot{m}_{ref\_LS}(h_2 - h_1)$$

*High Stage*

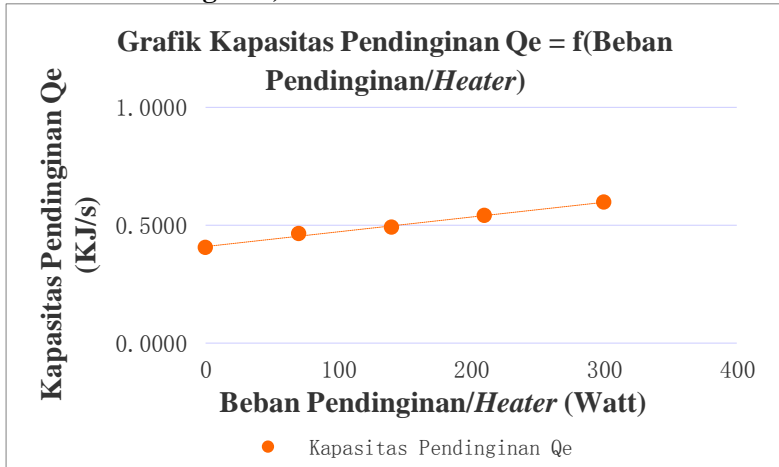
$$\dot{W}_{ref} = \dot{m}_{ref\_HS}(h_6 - h_5)$$

Dari hasil eksperimen yang didapat nilai kerja kompresi aktual untuk sistem *Low Stage* mengalami kenaikan dikarenakan laju aliran massa dapat diatur oleh alat ekspansi TXV dimana semakin besar nilai beban yang diberikan maka semakin besar pula nilai laju aliran massanya. Sementara sistem *High Stage* menggunakan alat ekspansi pipa kapiler dimana alat tersebut tidak dapat menyesuaikan dengan besar beban yang diberikan sehingga laju aliran massa yang mengalir di dalam sistem



cenderung mengalami perubahan yang sangat kecil bahkan tidak terjadi perubahan sama sekali.

#### 4.3.4 Grafik Kapasitas Pendinginan = f (Beban Pendinginan)



Gambar 4.4 Grafik Kapasitas Pendinginan = f (Beban Pendinginan)

Gambar di atas menunjukkan grafik kapasitas pendinginan ( $Q_{evap}$ ) *Low Stage* fungsi dari beban pendinginan. Grafik tersebut memiliki *trend line* cenderung mengalami kenaikan secara linear dimana hal tersebut dikarenakan  $Q_{evap} = COP \cdot W_c$ . Nilai COP untuk *range* tertentu adalah konstan maka hal tersebut menjadikan hubungan anatar kapasitas pendinginan dan beban pendinginan adalah linear dari beban 0 samapi dengan beban 300 Watt. Pada Beban 0, nilai kapasitas pendinginan memiliki nilai 0.354kJ/s dan pada beban maksimum 300 Watt, kapasitas evaporasi bernilai 0.5613 kJ/s.

Nilai dari kapasitas evaporator tersebut didapat dari persamaan berikut.

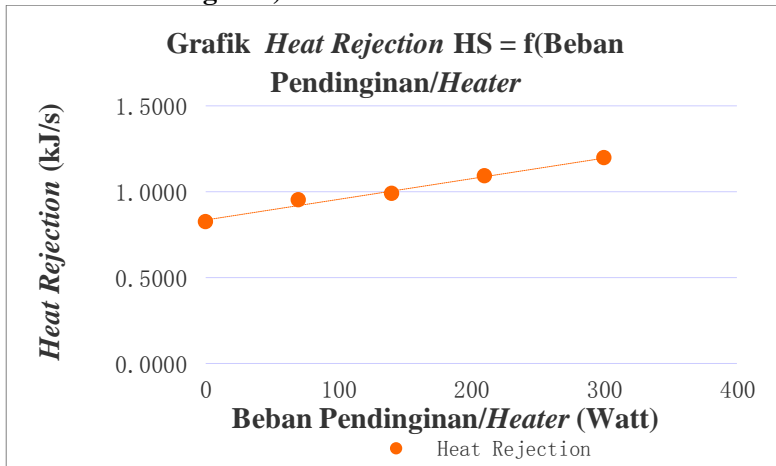
$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{ref\_LS}(h_1 - h_4)$$





Dari persamaan di atas, didapat nilai kapasitas evaporator yang bernilai sama dengan nilai beban pendinginan yang diberikan pada sistem *Low Stage*. Hal tersebut didasarkan pada teori kesetimbangan energi antara kalor yang diserap oleh evaporator dengan kalor yang dilepaskan oleh *electric heater* dan beban dari kabin. Namun nilai laju aliran massa pada tiap penggunaan alat ekspansi yang berbeda akan menghasilkan nilai yang berbeda begitupun penggunaan pipa kapiler dan TXV.

#### 4.3.5 Grafik *Heat Rejection High Stage* = f (Beban Pendinginan)



Gambar 4.5 Grafik *Heat Rejection High Stage* = f (Beban Pendinginan)

Gambar di atas menunjukkan adanya pengaruh beban pendinginan (*electric heater*) pada nilai pelepasan kalor di kondensor *High Stage (Heat Rejection)*. Grafik di atas memiliki *trend line* yang cenderung mengalami peningkatan dari beban 0 atau tanpa beban samapi dengan beban maksimal *electric heater* 300 Watt. Nilai kalor yang dilepaskan terendah terjadi pada beban



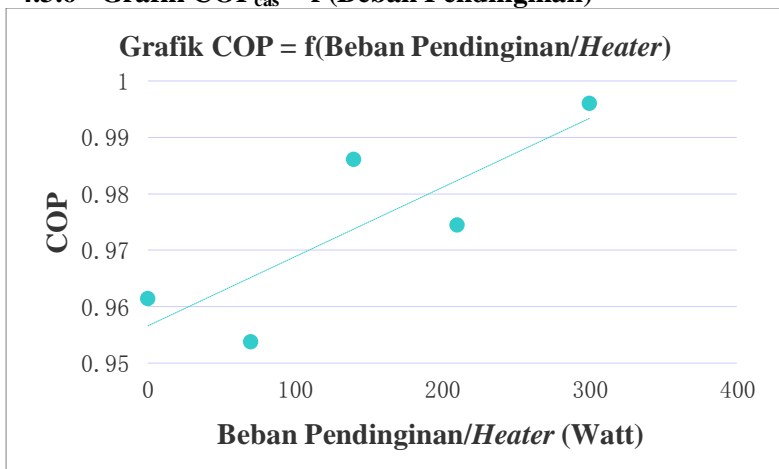
0 yaitu sebesar 0.7228 kJ/s dan nilai tertinggi adalah sebesar 1.1249 kJ/s.

Nilai kalor yang dilepas di kondensor *High Stage* akan dilepaskan dari sistem kelingkungan sehingga fasa refrigeran di kondensor perlahan akan berubah dari gas menjadi cair. Besarnya nilai kalor tersebut dapat dihitung dengan menggunakan perkalian laju aliran refrigeran sistem *High Stage* dengan selisih entalpi keluar dan masukan kondensor seperti pada perumusan di bawah ini.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{ref\_HS}(h_6 - h_7)$$

Meningkatnya nilai pelepasan kalor pada sistem *High Stage* dipengaruhi nilai laju aliran massa yang mengalir di dalam sistem tersebut. Selain itu, peningkatan nilai pelepasan kalor dipengaruhi pula oleh nilai entalpi masukan dan keluar kondensor dimana nilai tersebut dipengaruhi oleh besarnya nilai temperatur dan tekanan dari sistem tersebut.

#### 4.3.6 Grafik $COP_{cas} = f(\text{Beban Pendinginan})$



Gambar 4.6 Grafik  $COP_{cas} = f(\text{Beban Pendinginan})$



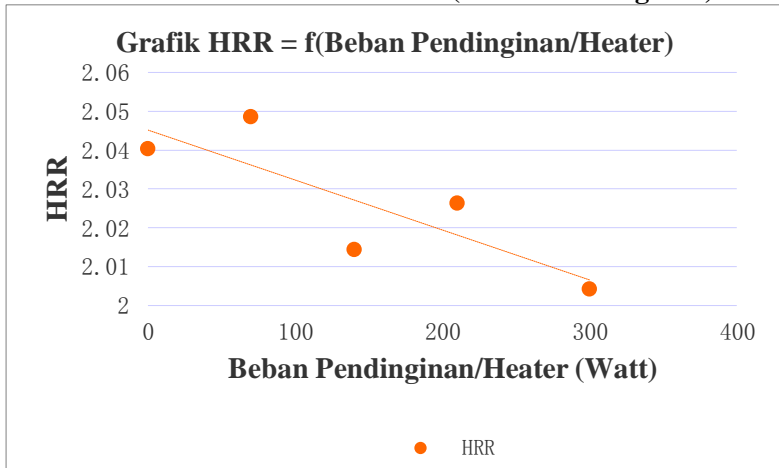
Gambar di atas menunjukkan grafik COP terhadap pengaruh perubahan beban. Grafik tersebut memiliki *trend line* cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah beban pendinginan. Nilai COP terendah terdapat pada beban 70 Watt dimana nilai COPnya adalah sebesar 0.9537 dan nilai COP terbesar terjadi pada saat beban 300 Watt yaitu COP bernilai 0.99597. Semakin besarnya nilai COP seiring dengan bertambahnya nilai beban dikarenakan nilai dari kapasitas pendinginan memiliki nilai yang semakin besar namun nilai kerja kompresinya tetap pada nilai yang cenderung konstan.

COP merupakan istilah efisiensi yang biasa digunakan pada sistem pendingin. Cara menghitungnya adalah dengan membagi kapasitas pendinginan yang didapat dengan nilai kerja kompresi. Sementara itu Sistem Refrigerasi *Cascade* menggunakan dua buah kompresor untuk menjalankan sistemnya maka persamaannya akan berubah menjadi kapasitas evaporator sistem *Low Stage* dibagi dengan penjumlahan nilai kerja kompresi pada masing-masing sistem seperti persamaan berikut.

$$COP_{cascade} = \frac{\dot{Q}_{e\_LS}}{W_{ref\_HS} + W_{ref\_LS}}$$



#### 4.3.7 Grafik HRR LS dan HS = f (Beban Pendinginan)



Gambar 4.7 Grafik HRR HS dan LS = f (Beban Pendinginan)

Gambar grafik di atas menunjukkan nilai *Heat Rejection Ratio* (HRR) atau perbandingan kalor yang dibuang di kondensor dengan kapasitas pendinginan fungsi beban pendinginan. Grafik di atas memiliki *trend line* cenderung menurun seiring dengan penambahan nilai beban pada sistem. Nilai HRR tertinggi didapat pada beban 70 Watt dengan nilai 2.048 dan nilai HRR terendah didapat pada beban 300 Watt dengan nilai HRR sebesar 2.004.

HRR merupakan rasio dari kalor yang dibuang oleh kondensor dengan kalor yang diserap oleh evaporator. Pada Sistem Refrigerasi *Cascade* HRR dapat dihitung secara langsung dengan membandingkan nilai kapasitas evaporator sistem *Low Stage* dengan kalor yang dibuang (*Heat Rejected*) oleh kondensor pada sistem *High Stage* seperti persamaan di bawah ini.

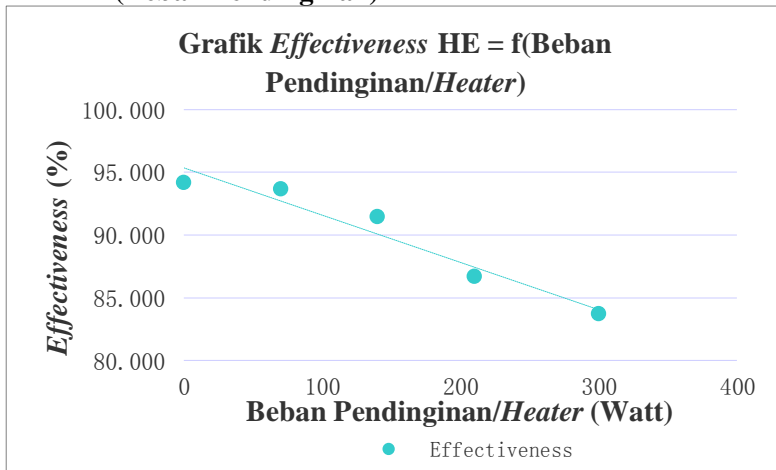
$$HRR = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_e} = \frac{\dot{m}_{ref\_HS}(h_6 - h_7)}{\dot{m}_{ref\_LS}(h_1 - h_4)}$$

Penurunan yang terjadi pada nilai HRR seiring dengan bertambahnya beban terjadi karena semakin besarnya nilai beban maka akan semakin besar pula nilai kapasitas pendinginannya



sementara nilai pembuangan kalornya tidak sebanding dengan nilai kapasitas pendinginan, melainkan lebih kecil. Kondisi demikian menyebabkan nilai penyebut lebih besar dibandingkan nilai pembilangnya sehingga nilai HRR mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya beban.

#### 4.3.8 Grafik *Effectiveness* ( $\epsilon$ ) *Plate Heat Exchanger* = $f$ (Beban Pendinginan)



Gambar 4.8 Grafik *Effectiveness* ( $\epsilon$ ) *Plate Heat Exchanger* =  $f$  (Beban Pendinginan)

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara *Effectiveness Heat Exchanger* dengan pengaruh berubahnya beban pendinginan. Grafik di atas memiliki *trend line* cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya nilai beban yang diberikan pada sistem. Nilai *effectiveness* tertinggi terjadi pada beban 0 dengan nilai 94.143% dan nilai terendah terjadi pada beban maksimal yaitu 300 Watt yaitu sebesar 83.685%.

*Effectiveness* ( $\epsilon$ ) *plate heat exchanger* yang semakin menurun tersebut diakibatkan oleh kemampuan penukaran kalor



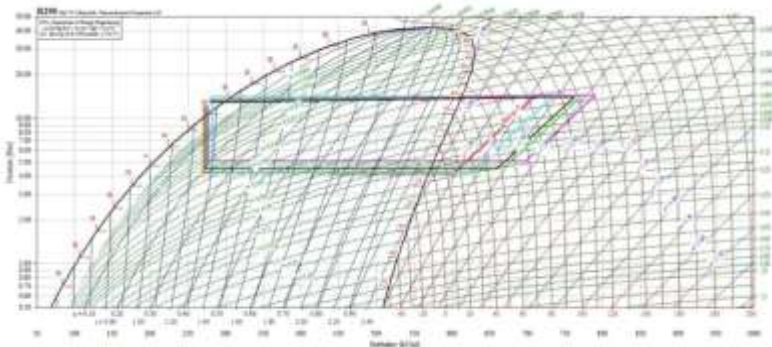
pada *cascade heat exchanger* adalah konstan, sedangkan panas yang harus ditukar pada *heatexchanger* semakin meningkat seiring dengan peningkatan laju aliran massa refrigeran karena naiknya pembebanan. Hal ini juga bisa dilihat dari persamaan berikut.

$$\varepsilon = \frac{q_{actual}}{q_{max}}$$

Nilai *effectiveness cascade heat exchanger* mengalami penurunan karena nilai  $q_{actual}$  dan  $q_{maksimal}$  mengalami penurunan. Hal tersebut dikarenakan nilai selisih tempeartur untuk  $q_{actual}$  semakin kecil sementara selaisih tempeartur maksimal untuk  $q_{maksimal}$  semakin besar.

#### 4.4 Analisa Diagram P-h

##### 4.4.1 Diagram P-h Sistem *High Stage*



Gambar 4.9 Hasil Plot Kurva Kerja Sistem *High Stage* dengan Software *Coolpack*

Gambar di atas merupakan gambar dari kurva siklus Refrigerasi *Cascade* untuk sistem *High Stage* dimana sistem tersebut menggunakan refrigeran MC-22 yang berasal dari senyawa *propane* sehingga untuk menganalisisnya dapat dilakukan dengan menggunakan diagram P-h R-290 (*Propane*). Gambar di kurva-kurva tersebut merupakan hasil analisis sitem refrigerasi *cascade* sistem *High Stage* dengan menggunakan



*software coolpack* dimana diperlukan beberapa parameter seperti nilai tekanan *discharge*, tekanan *suction*, temperatur *subcooled* dan temperatur *superheated*. Selain itu, gambar di atas menunjukkan proses dan hasil eksperimen dari Sistem Refrigerasi *Cascade* dengan beban yang berbeda yaitu 0 (tanpa beban/*Electric Heater Off*), beban 70 Watt, beban 140 Watt, beban 210 Watt dan beban 300 Watt. Kurva-kurva tersebut mengalami sedikit peningkatan pada tekanan-tekanannya namun hal yang lebih jelas adalah temperatur keluaran evaporator atau temperatur *suction* dimana semakin besar beban yang diberikan pada sistem maka temperatur *suction* yang didapat semakin tinggi.

Perubahan-perubahan tersebut terjadi karena beberapa alasan diantaranya adalah beban yang diberikan pada sistem dan penggunaan alat ekspansi berupa pipa kapiler pada sistem *High Stage*. Faktor-faktor tersebut mengakibatkan keluaran dari evaporator (*suction*) menjadi lebih *superheated* atau lebih bergeser ke sebelah kanan dan cenderung sangat besar sehingga dapat dipastikan bahwa fasa dari refrigeran yang mengalir di dalam sistem tersebut adalah gas. Sementara untuk sisi *subcooled*, hal yang terjadi adalah kebalikan dari kondisi *superheated* dimana kondisi *subcooled* yang didapatkan tidak terlalu besar dan cenderung konstan.

Kondisi keluaran evaporator yang menjadi masukan kompresor berada pada kondisi *superheated*. Hal tersebut menyebabkan fasa di dalamnya benar-benar gas sehingga menyebabkan massa jenis dari refrigeran tersebut menjadi lebih ringan yang pada akhirnya akan menyebabkan laju aliran massanya mengcil karena massa jenis dari gas yang kecil. Fasa gas dari refrigeran berpengaruh pada kerja kompresi dimana kerja kompresor menjadi lebih ringan dibandingkan kondisi dengan nilai *superheated* yang kecil. Selain itu dengan kondisi fasa yang berupa gas hal tersebut merupakan kondisi aman untuk kompresor karena fasa selain gas dilarang untuk masuk ke dalam kompresor dan ditakutkan kompresor mengalami kerusakan.

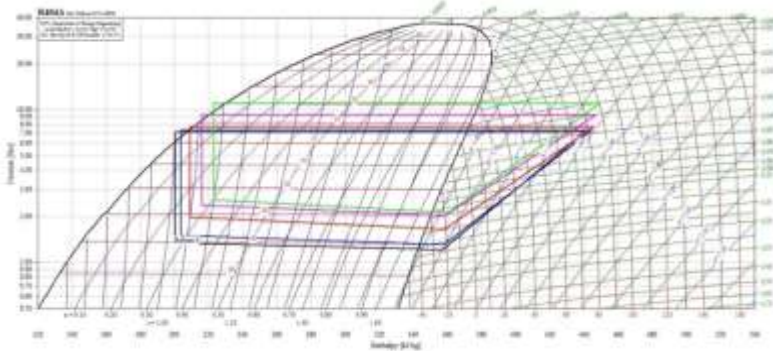


Setelah proses kompresi yang dilakukan kompresor refrigeran akan mengalami proses kondensasi pada kondensor dimana kalor dari refrigeran akan dilepaskan ke lingkungan. Sistem Refrigerasi *Cascadesisi High Stage* tersebut menggunakan bantuan *fan* dengan kecepatan maksimal sebesar 2.8 m/s sehingga laju pertukaran kalor pada kondensor tersebut menjadi lebih baik. Hal tersebut ditunjukkan oleh selisih temperatur masukan dan keluar kondensor. Proses selanjutnya adalah ekspansi, dimana alat ekspansi pada sistem ini berupa pipa kapiler. Proses ini akan menurunkan tekanan keluaran kondensor yang tidak jauh berbeda dengan nilai tekan keluaran kompresor. Nilai tekanan tersebut akan mengalami penurunan yang drasitis saat keluar alat ekspansi tersebut sehingga temperatur pun mengalami penurunan pula. Sistem dengan alat ekspansi pipa kapiler tidak memiliki perbedaan yang signifikan pada laju aliran massanya, karena pipa kapiler tidak dapat merubah diameter dari pipanya sehingga refrigeran yang dialirkan akan cenderung konstan pada jmlah tertentu. Jumlah laju aliran massa yang konstan tersebut akan terus dialirkan selama sistem bekerja dengan beban yang semakin membesar sehingga temperatur dari refrigeran akan mengalami peningkatan karena kalor yang dilapaskan ke lingkungan akan meningkat. Sementara pada proses evaporasi yang terjadi di evaporator kalor yang diserap akan semakin besar karena kondensor sistem *Low Stage* akan melepaskan kalor yang lebih besar namun kemampuan menyerap evaporator sistem *High Stage* akan terbatas pada nilai tertentu dimana refrigeran yang mengalir di dalam sistem *High Stage* memiliki nilai temperatur yang semakin tinggi dan massa yang dialirkan memiliki jumlah yang cenderung sama.





#### 4.4.2 Diagram P-h Sistem *Low Stage*



Gambar 4.10 Hasil Plot Kurva Kerja Sistem *Low Stage* Dengan *Software coolpack*

Gambar di atas menunjukkan adanya perbedaan kondisi pada setiap percobaan dengan beban yang berbeda. Beban yang diberikan adalah 0 (*Heater off*), 70 Watt, 140 Watt, 210 Watt, dan 300 Watt dimana semakin besar beban yang diberikan kurva yang dianalisis menggunakan *software Coolpack* mengalami peningkatan. Pada beban 0, kurva berada paling bawah kemudian meningkat sampai dengan beban maksimal 300 Watt. Setiap kurva memiliki nilai temperatur *subcooled*, temperatur *superheated*, temperatur keluar kompresor, temperatur masukan evaporator, tekanan *discharge*, dan tekanan *suction* yang berbeda sehingga akan menghasilkan nilai entalpi yang berbeda pula di setiap titiknya. Kurva tersebut menunjukkan pula proses yang terjadi pada Sistem Refrigerasi *Cascade* sisi *Low Stage* dimana sistem tersebut mengalami proses kompresi, kondensasi, ekspansi dan evaporasi.

Perbedaan kondisi tersebut terlihat jelas pada perbedaan tekanan di setiap pembebanan yang berbeda dimana semakin besar beban yang diberikan maka nilai tekanan akan mengalami peningkatan. Hal tersebut dikarenakan adanya pengaturan jumlah aliran massa (*massflow rate*) oleh alat ekspansi dimana pada sistem *Low Stage* alat ekspansi yang digunakan adalah TXV. Alat



tersebut akan mengatur jumlah flow rate refrigeran yang dibutuhkan oleh sistem sehingga jika jumlah aliran yang dialirkan pada sistem semakin besar hal tersebut menunjukkan bahwa diafragma yang dibuka oleh TXV semakin besar. Selain itu, TXV yang dilengkapi dengan bulb berisi cairan air raksa ditempatkan di keluaran evaporator akan membantu TXV untuk membuka diafragma sesuai kebutuhan berdasarkan temperatur keluaran evaporator sehingga dengan semakin besarnya nilai beban yang diberikan maka akan meningkatkan nilai properties dari refrigeran yang mengalir di dalam sistem *Low Stage*.

Analisis sistem refrigerasi dengan menggunakan *software coolpack* tersebut membutuhkan beberapa parameter seperti tekanan suction, tekanan discharge, temperatur *superheated*, dan temperatur subcooled. Jika meninjau hasil yang didapatkan dari *software* tersebut dapat dilihat bahwa kondisi sistem berada pada daerah *superheated* untuk keluaran evaporator dan telah berada pada kondisi *subcooled* untuk keluaran kondensor. Untuk kondisi *subcooled* nilai temperatur tidak selebar kondisi *superheated*. Hal tersebut dikarenakan pelepasan kalor pada sistem *Low Stage* dipengaruhi oleh penarikan kalor pada sistem *High Stage* dimana sistem tersebut menggunakan alat ekspansi pipa kapiler sehingga berpengaruh pada nilai kalor yang diserapnya tidak dapat diatur sesuai kebutuhan sistem karena pipa kapiler biasa digunakan untuk sistem refrigerasi dengan beban konstan.



***(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)***



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Hasil dari pengujian Sistem Refrigerasi *Cascade* dan pengolahan data yang telah dilakukan, maka penulis memperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Performa maksimum dari Sistem Refrigerasi *Cascade* ini adalah sebagai berikut.
  - ❖ Temperatur evaporator terendah yang dapat dicapai oleh Sistem Refrigerasi *Cascade* adalah  $-38.3^{\circ}\text{C}$ .
  - ❖ Nilai temperatur kabin terendah yang dicapai oleh sistem pendingin ini adalah sebesar  $-33.3^{\circ}\text{C}$ .
  - ❖ Kapasitas pendinginan pada sistem *Low Stage* adalah 0.5613 kW.
  - ❖ *Heat Rejection* pada sistem *High Stage* sebesar 1.1249 kW.
  - ❖ Kerja kompresor pada sistem *High Stage* adalah sebesar 0.2024 kW.
  - ❖ Kerja kompresor pada sistem *Low Stage* bernilai 0.3611 kW.
  - ❖ Nilai COP *cascade* adalah sebesar 0.9959
  - ❖ Nilai HRR *Cascade* maksimum pada *Low Stage* adalah 2.048.
2. Performa dari *Heat Exchanger* tipe *Plate Heat Exchanger* memiliki *effectiveness* tertinggi saat beban 0 yaitu mencapai 94.143% dan semakin menurun seiring dengan bertambahnya nilai pendinginan sampai dengan beban



maksimum (300 Watt) dimana *effectiveness* mencapai nilai 83.685%.

## **1.2 Saran**

Hal yang penulis kira dapat meningkatkan performa dari kerja Sistem Refrigerasi *Cascade* ini, penulis menyarankan agar dilakukan hal-hal berikut pada penelitian selanjutnya.

1. Gunakan *flowmeter* guna mengukur laju aliran massa refrigeran yang lebih aktual.
2. Sebaiknya dilakukan *replacement* pada kompresor *rotary High Stage* dengan kompresor torak dikarenakan kompresor *rotary* yang terpasang sekarang memiliki temperatur yang berlebihan.
3. Lakukan penggantian alat ukur baik itu *Thermocouple* maupun *Pressure Gauge* sehingga data hasil pengukuran dapat lebih aktual dibanding sebelumnya.
4. Gunakan *Gate Valve* sebagai alat bantu dalam pengukuran tekanan agar tekanan lebih aktual.

## DAFTAR PUSTAKA

Althouse dkk. 1982. *Modern Refrigeration and Air Conditioning*. Illinois: The Goodheart Wilcox Company Inc.

ASHRAE. 2001. *ASHRAE Handbook of Fundamental*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers: Atlanta.

Boyle, Graham. 1988. *Australian Refrigeration and Air Conditioning vol.2*. Australia: Trust Publication.

Dossat, Roy J. 1985. *Prinsciples of Refrigeration and Air Conditioning (Second Edition) SI Version*. New York: John Willey and Sons.

Ghani. S. Arrad. 2013. TA : Studi Variasi Beban Pendinginan Di Evaporator *Low Stage* Sistem Refrigerasi *Cascade* Menggunakan *Heat Exchanger* Tipe *Concentric Tube* Dengan Fluida Kerja Refrigeran Musicool-22 Di *High Stage* Dan R-404a Di *Low Stage*. Surabaya: ITS Surabaya.

Hernawan Mitrakusuma, Windy. 2009. *Bahan Ajar Dasar Refrigerasi*. Bandung: Polban.

Holman. J. P. 1997. *Perpindahan Kalor (alih bahasa E. Jasjfi)*. Jakarta: Erlangga.

Incropera, Frank P, dkk. 2007. *Fundamental of Heat and Mass Transfer 6th Edition*. US : John Wiley & Sons Inc.

Maclaine-cross. I. L, Leonardi, E. *Comparative Performance of Hydrocarbon Refrigerants*. Australia . The University of New South Wales.

Moran, Michael J. Shapiro, Howard N. 2006. *Fundamentals of Eengineering Thermodynamics*, 5th. US : John & Wiley Inc.

Stoecker, Wilbert F. Jones, Jerold W. 1987. *Refrigeration and Air Conditioning, 2nd Edition*. Jakarta : Erlangga.

Sun, Ying, 2012. *Research on A Intelligent Dual Temperature Box*. School of Energy and Architecture Engineering, 493-495.

Trott, A. R. Welch, T. 2000 : *Refrigeration and Air-Conditioning, 3rd.* Great Britian : Butterworth-Heinemann.

WHO, Jan. 2014. *Environmental Management Of Refrigerant Gases And Refrigeration Equipment* Technical Supplement to WHO Technical Report Series, 8-12.

## LAMPIRAN A

### DATA PENGUKURAN

Tabel A1. Data Pengukuran Beban Pendinginan 0

LOW STAGE												
Waktu	Temperatur						Tekanan				Kompresor	
	T1	T2	T3	T4	TK	TL	P1	P2	P3	P4	Voltage	Arus
menit	°C						Psig				Volt	Ampere
0	-24,8	78,1	1,6	-38,3	-33,3	26,5	1	90	90	3	210	2,5
5	-23,1	79,3	1,6	-38,3	-33,3	27	1	90	85	3	210	2,5
10	-23,1	79,2	1,6	-38,3	-33,3	28,1	1	90	90	3	210	2,5
15	-22,3	79,2	1,6	-38,3	-33,3	27,7	1	90	90	3	210	2,5
20	-22,3	79,6	1,6	-38,3	-33,3	27,7	1	90	90	3	210	2,5

HIGH STAGE										
Waktu	Temperatur				Tekanan				Kompresor	
	T5	T6	T7	T8	P5	P6	P7	P8	Volt	Arus
menit	°C				Psig				Volt	Ampere
0	13	83,1	31,9	-3,2	46	190	170	45	210	2,4
5	14,6	83,6	31,9	-3,5	46	190	172	45	210	2,4
10	14,7	84	31,9	-3,3	45	190	172	45	210	2,4
15	14,8	84,6	31,9	-3	46	190	172	45	210	2,4
20	14,7	84,5	31,9	-3,1	46	190	172	45	210	2,4

Keterangan :

T1, P1 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor

*Low Stage*

T2, P2 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor

*Low Stage*

T3, P3 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor

*Low Stage*

T4, P4 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator

*Low Stage*



T5, P5 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor  
*High Stage*

T6, P6 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor  
*High Stage*

T7, P7 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor  
*High Stage*

T8, P8 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator  
*High Stage*

Tabel A2. Data Pengukuran Beban Pendinginan 70 Watt

LOW STAGE												
Waktu	Temperatur						Tekanan (psig)				Kompresor	
	T1	T2	T3	T4	TK	TL	P1	P2	P3	P4	Voltage	Arus
menit	°C						Psig				Volt	Ampere
0	-21,9	83,1	2,8	-35,8	-31,1	28,1	1	92	92	4	210	2,5
5	-21,6	83,8	2,8	-35,8	-31,1	28,3	2	92	92	4	210	2,5
10	-21,8	83,2	2,8	-35,8	-31	28,3	2	92	92	5	210	2,5
15	-21,7	84,3	2,8	-35,8	-31,1	28,3	2	93	93	5	210	2,5
20	-21,9	84,7	2,8	-35,8	-30,9	28,2	2	93	93	5	210	2,5

HIGH STAGE										
Waktu	Temperatur				Tekanan (psig)				Kompresor	
	T5	T6	T7	T8	P5	P6	P7	P8	Volt	Arus
menit	°C				Psig				Volt	Ampere
0	24,4	94,7	32,1	-2,8	47	190	175	47	210	2,4
5	26,6	94,8	32,1	-2,7	46	190	175	46	210	2,4
10	27	94,4	32,1	-2,7	47	190	172	47	210	2,4
15	28	95,2	32,1	-2,6	47	190	172	47	210	2,4
20	28,5	95,6	32,1	-2,6	48	190	172	48	210	2,4

Keterangan :

T1, P1 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor  
*Low Stage*

- T2, P2 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor  
*Low Stage*
- T3, P3 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor  
*Low Stage*
- T4, P4 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator  
*Low Stage*
- T5, P5 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor  
*High Stage*
- T6, P6 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor  
*High Stage*
- T7, P7 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor  
*High Stage*
- T8, P8 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator  
*High Stage*

Tabel A3. Data Pengukuran Beban Pendinginan 140 Watt

LOW STAGE												
Waktu	Temperatur						Tekanan (psig)				Kompresor	
	T1	T2	T3	T4	TK	TL	P1	P2	P3	P4	Volt	Arus (A)
0	-20,5	84,7	6,2	-29,8	-24,8	27,6	5	100	100	8	210	2,6
5	-20,8	85	6,2	-29,7	-24,8	28,3	5	100	100	10	210	2,6
10	-20,7	85,5	6,4	-29,7	-24,8	28,3	5	100	100	10	210	2,6
15	-20,7	85,8	6,7	-29,7	-24,8	28,1	5	100	100	10	210	2,6
20	-20,7	85,9	6,9	-29,7	-24,7	28,3	5	100	100	10	210	2,6

HIGH STAGE										
Waktu	Temperatur				Tekanan (psig)				Kompresor	
	T5	T6	T7	T8	P5	P6	P7	P8	Volt	Arus (A)
0	45,6	106,5	32,9	-1	50	190	172	50	210	2,5
5	45,9	107,2	32,9	-1	50	190	172	50	210	2,5
10	46,4	107,7	32,8	-0,9	50	190	172	50	210	2,5
15	46,5	108,2	32,9	-0,8	50	190	172	50	210	2,5
20	46,6	108,7	32,9	-0,8	50	190	172	50	210	2,5

Keterangan :

T1, P1 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor

*Low Stage*

T2, P2 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor

*Low Stage*

T3, P3 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor

*Low Stage*

T4, P4 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator

*Low Stage*

T5, P5 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor

*High Stage*

T6, P6 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor

*High Stage*

T7, P7 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor

*High Stage*

T8, P8 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator

*High Stage*

Tabel A4. Data Beban Pengukuran 210 Watt

LOW STAGE												
Waktu	Temperatur						Tekanan (psig)				Kompresor	
	T1	T2	T3	T4	TK	TL	P1	P2	P3	P4	Volt	Arus (A)
0	-19,3	86,3	11,4	-26,7	-21,6	28,1	10	120	120	15	210	2,6
5	-19,3	86,6	11,3	-26,7	-21,6	28,1	10	120	120	15	210	2,6
10	-19,4	86,7	11,4	-26,7	-21,6	28,3	10	120	120	15	210	2,6
15	-19	87,1	11,4	-26,7	-21,5	27,8	10	120	120	15	210	2,6
20	-18,7	87,2	11,5	-26,6	-21,5	28	10	120	120	15	210	2,6

HIGH STAGE										
Waktu	Temperatur				Tekanan (psig)				Kompresor	
	T5	T6	T7	T8	P5	P6	P7	P8	Volt	Arus (A)
0	53	112,2	32,9	-0,1	54	195	175	54	210	2,5
5	53,3	112,2	32,9	-0,2	54	195	175	54	210	2,5
10	53,5	112,3	32,9	-0,2	54	195	175	54	210	2,5
15	53,8	112,5	32,9	-0,2	54	195	175	54	210	2,5
20	54,2	112,8	32,9	-0,2	54	195	175	54	210	2,5

Keterangan :

T1, P1 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor

*Low Stage*

T2, P2 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor

*Low Stage*

T3, P3 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor

*Low Stage*

T4, P4 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator

*Low Stage*

T5, P5 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor

*High Stage*

T6, P6 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor

*High Stage*

T7, P7 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor

*High Stage*

T8, P8 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator

*High Stage*

Tabel A5. Data Pengukuran Beban pendinginan 300 Watt

LOW STAGE												
Waktu	Temperatur						Tekanan (psig)				Kompresor	
	T1	T2	T3	T4	TK	TL	P1	P2	P3	P4	Volt	Arus (A)
0	-16,8	90,3	15,7	-23,6	-16,6	28	10	146	145	16	210	2,6
5	-16,8	90,4	15,6	-23,6	-16,6	28,3	10	145	145	16	210	2,6
10	-16,8	91	15,7	-23,6	-16,6	28,5	10	145	145	16	210	2,6
15	-16,8	91,3	15,7	-23,6	-16,5	28,1	10	145	145	17	210	2,6
20	-16,7	91,9	15,7	-23,6	-16,5	28,1	10	145	145	17	210	2,6

HIGH STAGE										
Waktu	Temperatur				Tekanan (psig)				Kompresor	
	T5	T6	T7	T8	P5	P6	P7	P8	Volt	Arus (A)
0	66,5	120,5	33,3	1	59	195	180	59	210	2,5
5	67	120,6	33,3	1	59	195	180	59	210	2,5
10	67,4	120,9	33,3	1	59	195	180	59	210	2,5
15	68,2	120,5	33,3	1	59	195	180	59	210	2,5
20	68,5	120,5	33,3	1	59	195	180	59	210	2,5

Keterangan :

T1, P1 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor

*Low Stage*

T2, P2 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor

*Low Stage*

T3, P3 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor

*Low Stage*

T4, P4 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator

*Low Stage*

T5, P5 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor

*High Stage*

T6, P6 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor

*High Stage*

T7, P7 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor  
*High Stage*

T8, P8 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator  
*High Stage*

Tabel A6. Data Pengukuran Rata-rata pada Masing-masing Beban

LOW STAGE												
Beban	Temperatur °C						Tekanan (psig)				Kompresor	
	T1	T2	T3	T4	TK	TL	P1	P2	P3	P4	Volt	Arus (A)
0	-23,12	79,08	1,6	-38,3	-33,3	27,4	1	90	89	3	210	2,5
70	-21,75	83,6	2,8	-35,8	-31,075	28,25	1,75	92,25	92,25	4,5	210	2,5
140	-20,68	85,38	6,48	-29,72	-24,78	28,12	5	7,895	100	9,6	210	2,6
210	-19,14	86,78	11,4	-26,68	-21,56	28,06	10	120	120	15	210	2,6
300	-16,78	90,98	15,68	-23,6	-16,56	28,2	10	145,2	145	16,4	210	2,6

HIGH STAGE											
Beban	Temperatur °C				Tekanan (psig)				Kompresor		
	T5	T6	T7	T8	P5	P6	P7	P8	Volt	Arus (A)	
0	14,36	83,96	31,9	-3,22	45,8	190	171,6	45	210	2,4	
70	26,9	94,94	32,1	-2,68	47	190	173,2	47	210	2,5	
140	46,2	107,66	32,88	-0,9	50	190	172	50	210	2,5	
210	53,56	112,4	32,9	-0,18	54	195	175	54	210	2,5	
300	67,52	120,6	33,3	1	59	195	180	59	210	2,5	

Keterangan :

T1, P1 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor  
*Low Stage*

T2, P2 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor  
*Low Stage*

T3, P3 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor  
*Low Stage*

T4, P4 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator  
*Low Stage*

T5, P5 = Temperatur dan tekanan masukan kompresor  
*High Stage*

T6, P6 = Temperatur dan tekanan keluaran kompresor  
*High Stage*

T7, P7 = Temperatur dan tekanan keluaran kondensor  
*High Stage*

T8, P8 = Temperatur dan tekanan masukan evaporator  
*High Stage*

## LAMPIRAN B

### PENGOLAHAN DATA

Tabel B1. Nilai Entalpi Masing-masing Data

Beban	Low Stage				High Stage			
	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8
Watt	kJ/kg							
0	357,123	441,218	200,434	200,434	601,412	709,533	271,416	271,416
70	358,037	444,358	204,003	204,003	623,602	733,295	272,934	272,934
140	358,309	445,543	209,344	209,344	658,518	762,37	274,332	274,332
210	358,934	446,681	216,251	216,251	671,649	773,078	273,363	273,363
300	360,678	449,166	223,145	223,145	697,759	789,994	277,466	277,466

Keterangan :

h1 = Entalpi masukan kompresor *Low Stage (Suction)*

h2 = Entalpi keluaran kompresor *Low Stage (Discharge)*

h3 = Entalpi keluaran kondensor *Low Stage*

h4 = Entalpi masukan evaporator *Low Stage*

h5 = Entalpi masukan kompresor *High Stage (Suction)*

h6 = Entalpi keluaran kompresor *High Stage (Discharge)*

h7 = Entalpi keluaran kondensor *High Stage*

h8 = Entalpi masukan evaporator *High Stage*



Tabel B2. Data Perhitungan Nilai Koefisien Konveksi

Tkabin	TL	Ts	Tf	Density	Viskositas	Pr	k
°C	°C	°C	K	m3/kg	m2/s		W/mK
-33,3	27,4	-32,8	239,95	1,4652	10,6661	0,7234	21,4558
-31,075	28,25	-30,575	242,175	1,4496	10,8374	0,7226	21,6427
-24,78	28,12	-24,28	248,47	1,4054	11,3222	0,7205	22,1714
-21,56	28,06	-21,06	251,69	1,3868	11,5904	0,7195	22,4352
-16,56	28,2	-16,6	256,42	1,3647	12,0113	0,7183	22,8138

1/U	Udepan	Overall Heat Coefficient	Beban Dinding	Beban Pintu Kaca	Total
		W/m2K	Watt		kW
0,11038	9,05983	9,0598	107,1233	296,4132	0,4035
0,11044	9,054937	9,0549	104,6967	289,5423	0,3942
0,11060	9,041809	9,0418	93,3579	257,8100	0,3512
0,11070	9,033586	9,0336	87,5693	241,6049	0,3292
0,11087	9,019682	9,0197	78,9924	217,6056	0,2966

1/Udinding	Udinding	Beban kaca
1,05100	0,951477	296,413163
1,05100	0,951477	289,542252
1,05100	0,951477	257,810010
1,05100	0,951477	241,604894
1,05100	0,951477	217,605606

Reynold Pintu Kaca	Nusselt Pintu Kaca	Koefisien Konveksi
		W/m <sup>2</sup> K
2117612,498	1289,9148	66,9703
2084140,723	1279,6798	66,6738
1994900,873	1251,9831	65,8893
1948739,186	1237,4129	65,4062
1880451,464	1215,5389	64,6032

Reynold	Nuselt	Coefficient Convection (W/m <sup>2</sup> K)
depan	depan	depan
2117612	3058,89	74,5805962
2084141	3019,046	74,25033816
1994901	2912,38	73,37674248
1948739	2857,03	72,83868933
1880451	2775,124	71,94445175

Tabel B3. Nilai *Effectiveness Plate Heat Exchanger*

Beban	Tmean Evaporator HS ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tmean Kondensor LS ( $^{\circ}\text{C}$ )	Pmean Evaporator HS (bar)	Pmean Kondensor LS (bar)	CP cold HS (KJ/kg.K)	CP hot LS(KJ/kg. K)
0	5,57	40,34	4,13	7,168	1,739	0,9802
70	12,11	43,2	4,24	7,36	1,758	0,984
140	22,65	45,93	4,447	7,895	1,791	0,9936
210	26,69	49,09	4,723	8,2737	1,81	1
300	34,26	53,33	5,0679	11,0035	1,841	0,9218

Cc (W/K)	Ch (Cmin) (W/K)	q (KW)	qmaks (KW)	Effectiveness %
0,00327	0,00252	0,1956	0,2078	94,143
0,00363	0,00297	0,2396	0,2559	93,649
0,00363	0,00328	0,2585	0,2827	91,446
0,00396	0,00378	0,2848	0,3286	86,684
0,00429	0,00400	0,3011	0,3598	83,685

Tabel B4. Data Hasil Pengolahan Performa Sistem

Beban	Tevap	Tkabin	Flowrate		Wact		Qc	Qe	COP	HRR	$\varepsilon$ , %
			LS	HS	LS	HS					
Watt	°C	°C	kg/s	kg/s	kW	kW	kW	kW			
0	-38,3	-33,3	0,0023	0,0016	0,190	0,178	0,815	0,400	0,961	2,040	94,143
70	-35,8	-31,075	0,0027	0,0019	0,233	0,203	0,943	0,460	0,954	2,049	93,649
140	-29,72	-24,78	0,0030	0,0019	0,263	0,192	0,982	0,488	0,986	2,014	91,446
210	-26,68	-21,56	0,0035	0,0020	0,307	0,206	1,086	0,536	0,974	2,026	86,684
300	-23,6	-16,56	0,0041	0,0022	0,361	0,202	1,189	0,594	0,996	2,004	83,685

Keterangan :

Tevap : Temperatur evaporator *Low Stage*

Tkabin : Temperatur kabin

*Flowrate* : Laju aliran massa refrigerab *Low Stage* dan *High Stage*

Wact : Kerja Kompresi kompresor *Low Stage* dan *High Stage*

Qc : *Heat Rejection* atau kalor yang dilepaskan oleh kondensor *High Stage*

Qe : *Cooling Load* atau kalor yang diserap oleh evaporator *Low Stage*

COP : *Coefficient of performance* atau bentuk nilai yang menunjukkan performa sistem refrigerasi

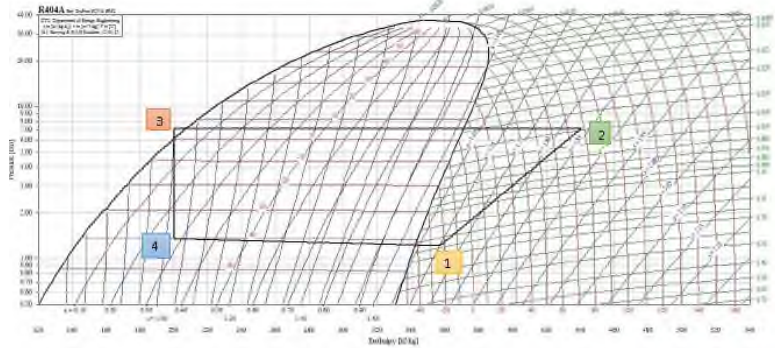
HRR : *Heat Rejection Ratio*

$\varepsilon$  : *Effectiveness Plate Heat Exchanger*

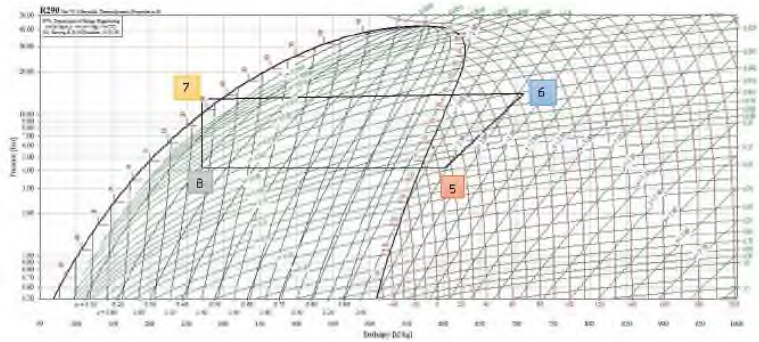
## LAMPIRAN C

### DIAGRAM P-h

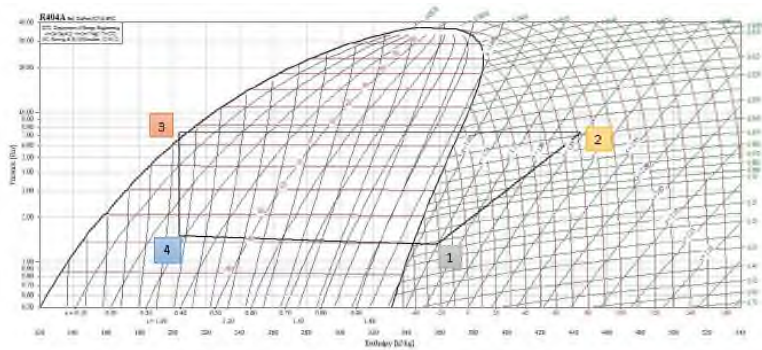
Gambar C1. Diagram P-h *Low Stage* pada Beban 0



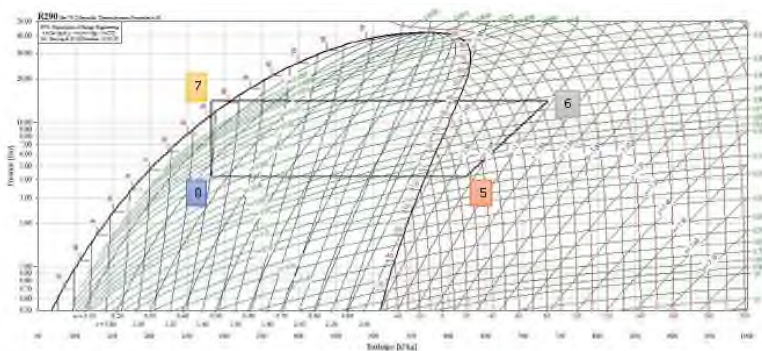
Gambar C2. Diagram P-h *High Stage* pada Beban 0



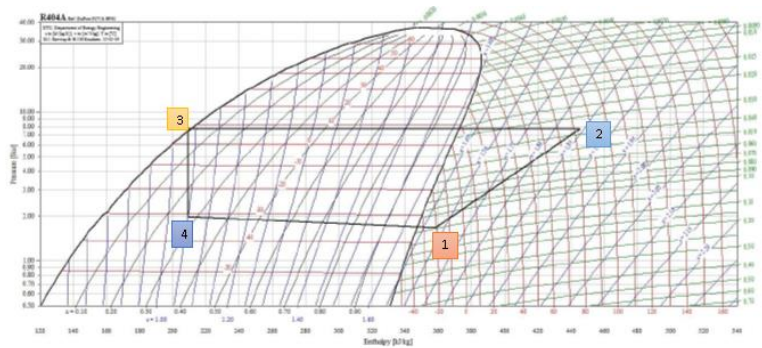
Gambar C3. Diagram P-h *Low Stage* pada Beban 70 Watt



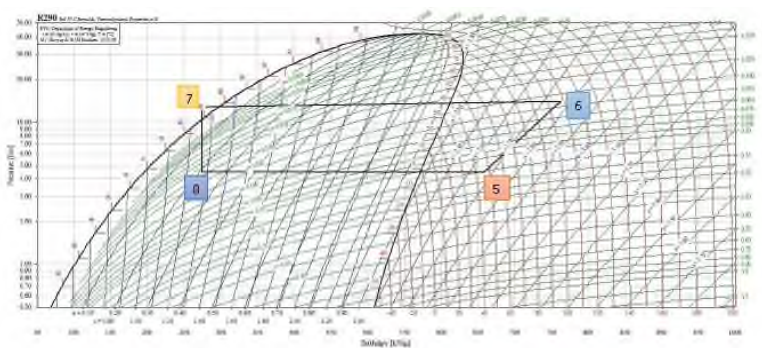
Gambar C4. Diagram P-h *High Stage* pada Beban 70 Watt



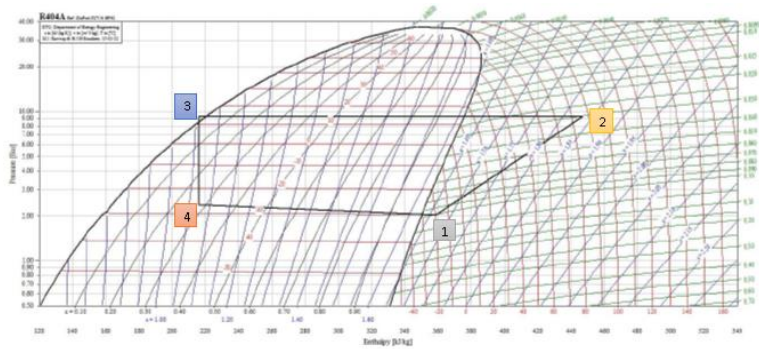
Gambar C5. Diagram P-h *Low Stage* pada Beban 140 Watt



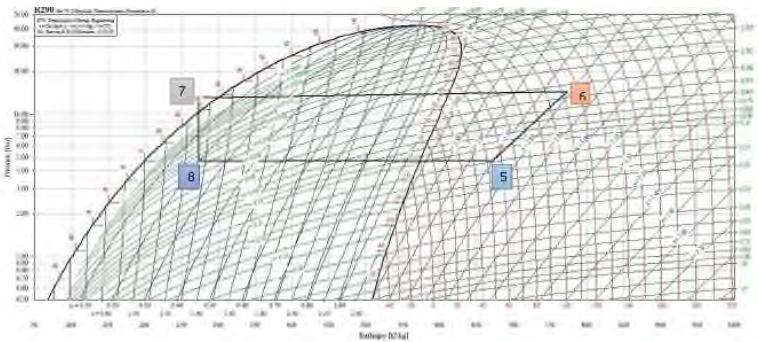
Gambar C6. Diagram P-h *High Stage* pada Beban 140 Watt



Gambar C7. Diagram P-h *Low Stage* pada Beban 210 Watt

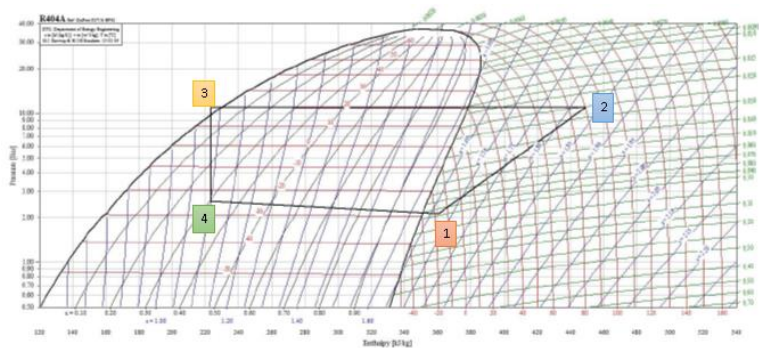


Gambar C8. Diagram P-h *High Stage* pada Beban 210 Watt

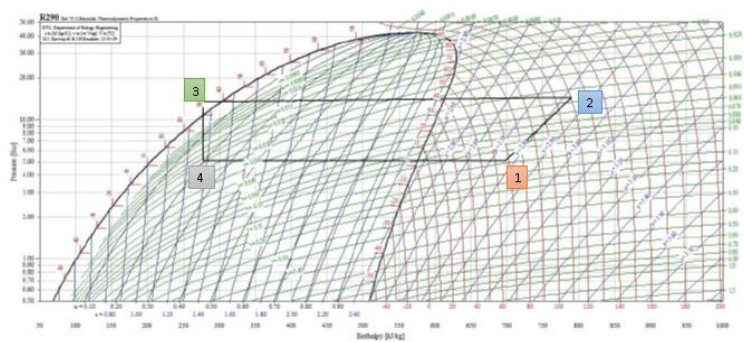




Gambar C9. Diagram P-h *Low Stage* pada Beban 300 Watt



Gambar C10. Diagram P-h *High Stage* pada Beban 300 Watt



Tabel C1. Data *Input* Diagram P-h dengan *Coolpack*

No	Data Input Coolpack				
	Beban 0	Beban 70 Watt	Beban 140 watt	Beban 210 Watt	Beban 300 Watt
Low Stage					
1	-23.12 °C, 1.07 Bar	-21.75°C, 1.12 Bar	-20.68°C, 1.344 Bar	-19.14 °C, 1.689 Bar	-16.78 °C, 1.689 Bar
2	79.08 °C, 7.2 Bar	83.6 °C, 7.36 Bar	85.38°C, 7.895 Bar	86.78 °C, 8.2737 Bar	90.98 °C, 11.01 Bar
3	1.6 °C, 7.136 Bar	2.8 °C, 7.36 Bar	6.48 °C, 7.895 Bar	11.4 °C, 8.2737 Bar	15.68 °C, 10.997 Bar
4	1.206 Bar	1.31 Bar	1.662 Bar	2.034 Bar	2.1307 Bar
High Stage					
5	14.36 °C, 4.157 Bar	26.9 °C, 4.157 Bar	46.2 °C, 4.447 Bar	53.56 °C, 4.157 Bar	67.52 °C, 5.0679 Bar
6	83.96 °C, 14.1 Bar	83.96 °C, 14.1 Bar	107.66 °C, 14.1 Bar	112.4 °C, 14.444 Bar	120.6 °C, 14.444 Bar
7	31.9 °C, 12.83 Bar	31.9 °C, 12.94 Bar	32.88 °C, 12.86 Bar	32.9 °C, 13.035 Bar	33.3 °C, 13.41Bar
8	4.03 Bar	4.24 Bar	4.447 Bar	4.723 Bar	5.0679 Bar

# LAMPIRAN C

## PROPERTIES

Tabel D1. Properties Refrigeran Musicool-22

Table of saturated values for: R290, CH3CH2CH3, Propane

T °C	P Bar	V <sub>l</sub> dm <sup>3</sup> /kg	V <sub>g</sub> m <sup>3</sup> /kg	h <sub>l</sub> kJ/kg	h <sub>g</sub> kJ/kg	h <sub>fg</sub> kJ/kg	s <sub>l</sub> kJ/(kg K)	s <sub>g</sub> kJ/(kg K)
-56.00	0.520	1.7107	0.76728	70.29	509.50	439.21	0.4726	2.4952
-55.00	0.547	1.7137	0.73211	72.51	510.68	438.17	0.4827	2.4913
-54.00	0.575	1.7167	0.69889	74.73	511.86	437.13	0.4929	2.4876
-53.00	0.604	1.7198	0.66749	76.95	513.04	436.09	0.5030	2.4838
-52.00	0.635	1.7229	0.63780	79.18	514.22	435.04	0.5130	2.4802
-51.00	0.666	1.7259	0.60971	81.41	515.40	433.99	0.5231	2.4767
-50.00	0.699	1.7290	0.58311	83.64	516.57	432.93	0.5331	2.4732
-49.00	0.733	1.7322	0.55792	85.88	517.75	431.87	0.5431	2.4698
-48.00	0.768	1.7353	0.53405	88.13	518.92	430.80	0.5530	2.4664
-47.00	0.805	1.7384	0.51142	90.37	520.10	429.73	0.5630	2.4632
-46.00	0.843	1.7416	0.48996	92.62	521.27	428.65	0.5729	2.4599
-45.00	0.882	1.7448	0.46958	94.88	522.45	427.57	0.5827	2.4568
-44.00	0.923	1.7480	0.45024	97.13	523.62	426.48	0.5926	2.4537
-43.00	0.965	1.7512	0.43187	99.39	524.79	425.39	0.6024	2.4507
-42.00	1.009	1.7545	0.41460	101.66	525.96	424.30	0.6122	2.4478
-41.00	1.054	1.7577	0.39780	103.92	527.12	423.20	0.6219	2.4449
-40.00	1.101	1.7610	0.38201	106.20	528.29	422.10	0.6316	2.4420
-39.00	1.149	1.7643	0.36698	108.47	529.46	420.99	0.6413	2.4393
-38.00	1.199	1.7676	0.35266	110.75	530.62	419.88	0.6510	2.4366
-37.00	1.251	1.7709	0.33903	113.03	531.78	418.76	0.6606	2.4339
-36.00	1.305	1.7743	0.32604	115.31	532.95	417.64	0.6702	2.4313
-35.00	1.360	1.7776	0.31366	117.59	534.10	416.51	0.6798	2.4288
-34.00	1.417	1.7810	0.30185	119.88	535.26	415.38	0.6894	2.4263
-33.00	1.475	1.7844	0.29058	122.17	536.42	414.25	0.6989	2.4238
-32.00	1.536	1.7878	0.27983	124.47	537.58	413.11	0.7084	2.4214
-31.00	1.599	1.7913	0.26956	126.77	538.73	411.96	0.7178	2.4191
-30.00	1.663	1.7948	0.25975	129.07	539.88	410.81	0.7273	2.4168
-29.00	1.730	1.7982	0.25037	131.37	541.03	409.66	0.7367	2.4146
-28.00	1.799	1.8018	0.24141	133.68	542.18	408.50	0.7461	2.4124
-27.00	1.869	1.8053	0.23284	135.99	543.33	407.33	0.7554	2.4102
-26.00	1.942	1.8088	0.22464	138.30	544.47	406.17	0.7647	2.4081
-25.00	2.016	1.8124	0.21679	140.62	545.61	404.99	0.7740	2.4061
-24.00	2.093	1.8160	0.20928	142.94	546.75	403.81	0.7833	2.4041
-23.00	2.173	1.8196	0.20208	145.27	547.89	402.63	0.7926	2.4021
-22.00	2.254	1.8233	0.19518	147.59	549.03	401.43	0.8018	2.4002
-21.00	2.338	1.8270	0.18858	149.93	550.16	400.24	0.8110	2.3983
-20.00	2.424	1.8307	0.18234	152.26	551.30	399.03	0.8202	2.3966
-19.00	2.513	1.8344	0.17646	154.60	552.43	397.83	0.8293	2.3947
-18.00	2.604	1.8381	0.17093	156.94	553.55	396.61	0.8385	2.3929
-17.00	2.697	1.8419	0.16474	159.29	554.68	395.39	0.8476	2.3912
-16.00	2.793	1.8457	0.15896	161.64	555.80	394.16	0.8567	2.3895
-15.00	2.892	1.8495	0.15420	164.00	556.92	392.92	0.8658	2.3878
-14.00	2.993	1.8534	0.14926	166.36	558.04	391.68	0.8748	2.3862
-13.00	3.097	1.8573	0.14448	168.73	559.15	390.43	0.8839	2.3846
-12.00	3.204	1.8612	0.13991	171.10	560.27	389.17	0.8929	2.3831
-11.00	3.313	1.8651	0.13550	173.47	561.38	387.90	0.9019	2.3816
-10.00	3.425	1.8691	0.13127	175.85	562.48	386.63	0.9109	2.3801
-9.00	3.540	1.8731	0.12719	178.24	563.59	385.35	0.9198	2.3787
-8.00	3.668	1.8771	0.12327	180.63	564.69	384.06	0.9288	2.3772
-7.00	3.779	1.8812	0.11950	183.03	565.79	382.75	0.9377	2.3758
-6.00	3.902	1.8853	0.11586	185.44	566.88	381.44	0.9467	2.3745
-5.00	4.029	1.8894	0.11236	187.85	567.97	380.13	0.9556	2.3732
-4.00	4.159	1.8935	0.10899	190.26	569.06	378.80	0.9645	2.3719
-3.00	4.292	1.8977	0.10573	192.69	570.15	377.46	0.9734	2.3706
-2.00	4.428	1.9020	0.10260	195.12	571.23	376.11	0.9823	2.3694
-1.00	4.568	1.9062	0.09967	197.56	572.31	374.76	0.9911	2.3681
0.00	4.710	1.9104	0.09684	200.00	573.38	373.38	1.0000	2.3669
1.00	4.856	1.9149	0.09385	202.45	574.45	372.00	1.0089	2.3658
2.00	5.005	1.9193	0.09113	204.91	575.52	370.61	1.0177	2.3646
3.00	5.158	1.9237	0.08861	207.38	576.58	369.21	1.0265	2.3636

Table of saturated values for: R290, CH3CH2CH3, Propane

T °C	p Bar	v <sub>l</sub> dm <sup>3</sup> /kg	v <sub>g</sub> m <sup>3</sup> /kg	h <sub>l</sub> kJ/kg	h <sub>g</sub> kJ/kg	R kJ/kg	s <sub>l</sub> kJ/(kg K)	s <sub>g</sub> kJ/(kg K)
4.00	5.314	1.3282	0.08598	209.85	577.64	367.79	1.0354	2.3624
5.00	5.474	1.3327	0.08353	212.33	578.70	366.37	1.0442	2.3614
6.00	5.637	1.3372	0.08117	214.82	579.75	364.93	1.0530	2.3603
7.00	5.804	1.3418	0.07889	217.32	580.80	363.48	1.0618	2.3593
8.00	5.974	1.3465	0.07669	219.83	581.84	362.01	1.0707	2.3583
9.00	6.148	1.3511	0.07456	222.30	582.88	360.58	1.0793	2.3573
10.00	6.326	1.3559	0.07250	224.83	583.92	359.09	1.0881	2.3564
11.00	6.508	1.3607	0.07051	227.38	584.95	357.59	1.0969	2.3554
12.00	6.694	1.3655	0.06858	229.90	585.97	356.08	1.1057	2.3545
13.00	6.883	1.3704	0.06671	232.45	586.99	354.55	1.1145	2.3536
14.00	7.076	1.3753	0.06490	235.00	588.01	353.01	1.1233	2.3527
15.00	7.274	1.3803	0.06316	237.57	589.02	351.45	1.1321	2.3518
16.00	7.475	1.3854	0.06146	240.15	590.03	349.88	1.1409	2.3509
17.00	7.681	1.3905	0.05982	242.73	591.03	348.29	1.1497	2.3501
18.00	7.890	1.3956	0.05823	245.33	592.02	346.69	1.1585	2.3492
19.00	8.104	2.0009	0.05669	247.93	593.01	345.08	1.1673	2.3484
20.00	8.322	2.0062	0.05520	250.58	593.99	343.44	1.1760	2.3476
21.00	8.545	2.0115	0.05375	253.17	594.97	341.80	1.1848	2.3468
22.00	8.771	2.0170	0.05235	255.81	595.94	340.14	1.1936	2.3460
23.00	9.003	2.0226	0.05099	258.45	596.91	338.46	1.2024	2.3452
24.00	9.238	2.0280	0.04967	261.10	597.87	336.76	1.2112	2.3445
25.00	9.478	2.0337	0.04839	263.77	598.82	335.05	1.2200	2.3437
26.00	9.723	2.0394	0.04715	266.44	599.76	333.32	1.2287	2.3430
27.00	9.972	2.0452	0.04594	269.12	600.70	331.58	1.2375	2.3422
28.00	10.226	2.0511	0.04477	271.82	601.63	329.82	1.2463	2.3415
29.00	10.486	2.0571	0.04364	274.52	602.56	328.04	1.2551	2.3408
30.00	10.749	2.0631	0.04253	277.23	603.47	326.24	1.2639	2.3401
31.00	11.017	2.0693	0.04146	279.96	604.38	324.43	1.2727	2.3393
32.00	11.290	2.0755	0.04042	282.69	605.28	322.59	1.2815	2.3386
33.00	11.568	2.0819	0.03940	285.44	606.18	320.74	1.2903	2.3379
34.00	11.852	2.0883	0.03842	288.19	607.06	318.87	1.2990	2.3372
35.00	12.140	2.0949	0.03746	290.96	607.94	316.98	1.3078	2.3365
36.00	12.433	2.1016	0.03653	293.74	608.80	315.07	1.3166	2.3358
37.00	12.732	2.1084	0.03563	296.53	609.66	313.13	1.3255	2.3351
38.00	13.036	2.1153	0.03476	299.33	610.51	311.18	1.3343	2.3344
39.00	13.345	2.1223	0.03389	302.14	611.35	309.21	1.3431	2.3336
40.00	13.659	2.1295	0.03305	304.96	612.17	307.21	1.3519	2.3329
41.00	13.979	2.1368	0.03224	307.80	612.99	305.19	1.3607	2.3322
42.00	14.305	2.1442	0.03146	310.65	613.80	303.15	1.3695	2.3315
43.00	14.636	2.1518	0.03068	313.51	614.59	301.09	1.3784	2.3307
44.00	14.973	2.1596	0.02993	316.38	615.37	299.09	1.3872	2.3300
45.00	15.315	2.1675	0.02920	319.27	616.15	297.07	1.3961	2.3292
46.00	15.663	2.1756	0.02849	322.18	616.90	294.73	1.4050	2.3284
47.00	16.017	2.1838	0.02779	325.09	617.65	292.56	1.4139	2.3277
48.00	16.377	2.1923	0.02712	328.02	618.38	290.36	1.4228	2.3269
49.00	16.742	2.2009	0.02646	330.97	619.10	288.13	1.4317	2.3260
50.00	17.114	2.2097	0.02581	333.94	619.80	285.86	1.4406	2.3252
51.00	17.492	2.2188	0.02518	336.92	620.49	283.57	1.4496	2.3244
52.00	17.876	2.2281	0.02457	339.92	621.16	281.24	1.4585	2.3235
53.00	18.266	2.2376	0.02397	342.94	621.81	278.88	1.4675	2.3226
54.00	18.663	2.2474	0.02339	345.97	622.45	276.48	1.4766	2.3217
55.00	19.066	2.2574	0.02282	349.03	623.07	274.04	1.4856	2.3207
56.00	19.475	2.2678	0.02226	352.11	623.67	271.56	1.4947	2.3197
57.00	19.891	2.2784	0.02172	355.22	624.25	269.03	1.5038	2.3187
58.00	20.313	2.2893	0.02118	358.35	624.81	266.47	1.5130	2.3177
59.00	20.743	2.3006	0.02066	361.50	625.35	263.86	1.5222	2.3166
60.00	21.179	2.3122	0.02016	364.68	625.87	261.18	1.5315	2.3155
61.00	21.621	2.3242	0.01966	367.90	626.36	258.47	1.5408	2.3143
62.00	22.071	2.3367	0.01917	371.14	626.83	255.69	1.5502	2.3131
63.00	22.528	2.3495	0.01869	374.41	627.27	252.85	1.5596	2.3118

Table of saturated values for R290, CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>, Propane

T °C	p Bar	v <sub>l</sub> dm <sup>3</sup> /kg	v <sub>g</sub> m <sup>3</sup> /kg	h <sub>l</sub> kJ/kg	h <sub>g</sub> kJ/kg	R kJ/kg	s <sub>l</sub> kJ/(kg K)	s <sub>g</sub> kJ/(kg K)
64.00	22.952	2.3628	0.01823	377.72	627.68	245.96	1.5691	2.3105
65.00	23.463	2.3766	0.01777	381.07	628.07	247.00	1.5797	2.3052
66.00	23.941	2.3909	0.01732	384.46	628.43	243.97	1.5894	2.3077
67.00	24.428	2.4058	0.01688	387.88	628.75	240.86	1.5981	2.3062
68.00	24.919	2.4212	0.01645	391.35	629.04	237.68	1.6080	2.3047
69.00	25.419	2.4374	0.01603	394.88	629.29	234.41	1.6179	2.3030
70.00	25.927	2.4542	0.01562	398.45	629.50	231.05	1.6280	2.3013
71.00	26.442	2.4719	0.01521	402.08	629.68	227.60	1.6382	2.2996
72.00	26.965	2.4903	0.01481	405.76	629.81	224.05	1.6485	2.2976
73.00	27.496	2.5097	0.01442	409.51	629.90	220.39	1.6589	2.2956
74.00	28.034	2.5301	0.01403	413.34	629.93	216.68	1.6696	2.2936
75.00	28.580	2.5516	0.01366	417.22	629.91	212.89	1.6803	2.2913
76.00	29.134	2.5742	0.01329	421.15	629.85	208.98	1.6913	2.2890
77.00	29.696	2.5983	0.01292	425.13	629.72	204.93	1.7024	2.2865
78.00	30.266	2.6238	0.01256	429.34	629.51	200.71	1.7138	2.2838
79.00	30.844	2.6509	0.01220	433.57	629.24	195.67	1.7254	2.2810
80.00	31.430	2.6800	0.01185	437.90	628.89	190.99	1.7372	2.2780
81.00	32.024	2.7111	0.01150	442.35	628.46	186.11	1.7493	2.2748
82.00	32.626	2.7447	0.01115	446.91	627.93	181.02	1.7617	2.2714
83.00	33.236	2.7810	0.01081	451.62	627.30	175.68	1.7745	2.2678
84.00	33.854	2.8204	0.01047	456.47	626.56	170.09	1.7876	2.2638
85.00	34.481	2.8636	0.01014	461.49	625.68	164.19	1.8012	2.2596
86.00	35.115	2.9111	0.00980	466.70	624.66	157.96	1.8152	2.2550
87.00	35.767	2.9628	0.00947	472.13	623.57	151.36	1.8297	2.2500
88.00	36.407	3.0229	0.00913	477.79	622.09	144.30	1.8449	2.2445
89.00	37.065	3.0898	0.00879	483.75	620.48	136.73	1.8608	2.2384
90.00	37.731	3.1667	0.00846	490.06	618.68	128.64	1.8776	2.2316
91.00	38.404	3.2565	0.00810	496.83	616.35	119.92	1.8957	2.2239
92.00	39.085	3.3638	0.00775	504.15	613.67	109.52	1.9151	2.2151
93.00	39.772	3.4963	0.00737	512.26	610.48	96.16	1.9366	2.2047
94.00	40.469	3.6675	0.00697	521.52	606.27	84.75	1.9612	2.1921
95.00	41.171	3.9070	0.00652	532.78	600.70	67.92	1.9911	2.1756
96.00	41.881	4.3059	0.00596	548.51	592.03	43.92	2.0330	2.1509
96.67	42.359	5.0660	0.00507	572.70	572.70	0.00	2.0979	2.0979

Copyright © 1999 Dep. of Energy Engineering, DTU

M.J. Skovrup &amp; H.J.H. Knudsen

PT. TEACH INTEGRATION

Komp. Perumahan Ciputurik Blok GGR Sukupang Batam

Phone: +62 779 323 758

Fax: +62 779 323 759

E-mail: teach.integration@gmail.com

<http://teachintegration.wordpress.com>



Tabel D2. Properties Refrigeran R-404a

Table of saturated values for: R404A, R125/143a/134a (44/52/4), R404A

T °C	P Bar	v <sub>l</sub> dm <sup>3</sup> /kg	v <sub>g</sub> m <sup>3</sup> /kg	h <sub>l</sub> kJ/kg	h <sub>g</sub> kJ/kg	R kJ/kg	s <sub>l</sub> kJ/(kg K)	s <sub>g</sub> kJ/(kg K)
-59.00	0.515	0.7578	0.34646	121.49	331.41	209.92	0.6802	1.6605
-58.00	0.544	0.7594	0.32922	122.69	332.07	209.38	0.6858	1.6589
-57.00	0.575	0.7610	0.31300	123.89	332.72	208.83	0.6913	1.6571
-56.00	0.606	0.7626	0.29774	125.10	333.38	208.28	0.6969	1.6550
-55.00	0.639	0.7642	0.28337	126.30	334.03	207.73	0.7024	1.6546
-54.00	0.674	0.7659	0.26984	127.52	334.69	207.17	0.7079	1.6533
-53.00	0.710	0.7676	0.25708	128.73	335.34	206.61	0.7134	1.6519
-52.00	0.747	0.7692	0.24504	129.95	336.00	206.05	0.7189	1.6507
-51.00	0.786	0.7709	0.23368	131.17	336.65	205.48	0.7244	1.6494
-50.00	0.827	0.7726	0.22295	132.39	337.30	204.91	0.7299	1.6482
-49.00	0.869	0.7744	0.21282	133.62	337.95	204.34	0.7354	1.6470
-48.00	0.913	0.7761	0.20324	134.85	338.61	203.76	0.7409	1.6458
-47.00	0.958	0.7779	0.19418	136.09	339.26	203.18	0.7463	1.6447
-46.00	1.006	0.7797	0.18561	137.33	339.91	202.59	0.7518	1.6436
-45.00	1.055	0.7816	0.17749	138.57	340.57	202.00	0.7572	1.6426
-44.00	1.106	0.7834	0.16980	139.81	341.22	201.41	0.7626	1.6415
-43.00	1.159	0.7853	0.16261	141.06	341.87	200.81	0.7680	1.6406
-42.00	1.214	0.7872	0.15599	142.31	342.62	200.20	0.7735	1.6396
-41.00	1.271	0.7891	0.14903	143.57	343.37	199.60	0.7789	1.6386
-40.00	1.330	0.7911	0.14261	144.83	343.81	198.99	0.7843	1.6377
-39.00	1.391	0.7931	0.13689	146.09	344.46	198.37	0.7896	1.6368
-38.00	1.454	0.7951	0.13128	147.36	345.11	197.75	0.7950	1.6360
-37.00	1.520	0.7971	0.12593	148.63	345.75	197.12	0.8004	1.6351
-36.00	1.587	0.7992	0.12086	149.91	346.40	196.49	0.8058	1.6343
-35.00	1.658	0.8012	0.11602	151.15	347.05	195.85	0.8113	1.6336
-34.00	1.730	0.8034	0.11142	152.42	347.69	195.22	0.8168	1.6328
-33.00	1.805	0.8055	0.10704	153.69	348.33	194.59	0.8223	1.6321
-32.00	1.882	0.8077	0.10287	154.98	348.97	193.95	0.8279	1.6313
-31.00	1.962	0.8099	0.09889	156.27	349.60	193.32	0.8334	1.6306
-30.00	2.045	0.8121	0.09510	157.57	350.26	192.69	0.8441	1.6300
-29.00	2.130	0.8143	0.09148	158.84	350.89	192.05	0.8493	1.6294
-28.00	2.218	0.8166	0.08803	160.12	351.52	191.41	0.8545	1.6287
-27.00	2.309	0.8189	0.08473	161.40	352.16	190.76	0.8596	1.6281
-26.00	2.402	0.8213	0.08158	162.69	352.79	190.10	0.8648	1.6275
-25.00	2.499	0.8236	0.07859	163.97	353.41	189.44	0.8699	1.6269
-24.00	2.598	0.8261	0.07570	165.26	354.04	188.78	0.8751	1.6264
-23.00	2.701	0.8286	0.07295	166.54	354.66	188.10	0.8802	1.6258
-22.00	2.806	0.8310	0.07032	167.83	355.29	187.42	0.8854	1.6253
-21.00	2.915	0.8335	0.06781	169.11	355.91	186.73	0.8905	1.6248
-20.00	3.027	0.8361	0.06540	170.40	356.52	186.04	0.8957	1.6243
-19.00	3.142	0.8387	0.06309	171.69	357.14	185.34	0.9008	1.6238
-18.00	3.260	0.8413	0.06088	172.97	357.75	184.63	0.9060	1.6233
-17.00	3.382	0.8440	0.05876	174.26	358.36	183.92	0.9111	1.6228
-16.00	3.507	0.8467	0.05673	175.55	358.97	183.21	0.9162	1.6224
-15.00	3.635	0.8495	0.05479	176.84	359.58	182.50	0.9214	1.6220
-14.00	3.767	0.8523	0.05292	178.13	360.19	181.79	0.9265	1.6215
-13.00	3.903	0.8551	0.05113	179.42	360.79	181.08	0.9316	1.6211
-12.00	4.043	0.8580	0.04941	180.71	361.39	180.37	0.9367	1.6207
-11.00	4.186	0.8610	0.04775	182.00	361.99	179.66	0.9418	1.6204
-10.00	4.333	0.8640	0.04617	183.29	362.58	178.95	0.9470	1.6200
-9.00	4.484	0.8670	0.04464	184.58	363.18	178.24	0.9522	1.6196
-8.00	4.639	0.8701	0.04318	185.87	363.74	177.53	0.9573	1.6192
-7.00	4.798	0.8733	0.04177	187.16	364.32	176.82	0.9624	1.6189
-6.00	4.961	0.8765	0.04041	188.45	364.90	176.11	0.9676	1.6186
-5.00	5.128	0.8798	0.03911	189.74	365.47	175.40	0.9727	1.6182
-4.00	5.299	0.8831	0.03785	191.03	366.04	174.69	0.9779	1.6179
-3.00	5.475	0.8865	0.03665	192.32	366.61	173.98	0.9830	1.6176
-2.00	5.656	0.8899	0.03548	193.61	367.17	173.27	0.9881	1.6172
-1.00	5.839	0.8934	0.03436	194.90	367.73	172.56	0.9932	1.6169
0.00	6.028	0.8970	0.03328	196.19	368.28	171.85	0.9984	1.6166

Printed: 06/09/10 22:15. Reference: DuPont SUVA HP52

Table of saturated values for: R404A, R125/143a/134a (44/52/4), R404A

T °C	p bar	$v_l$ dm <sup>3</sup> /kg	$v_g$ m <sup>3</sup> /kg	$h_l$ kJ/kg	$h_g$ kJ/kg	$R$ kJ/kg	$z_l$ kJ/(kg K)	$z_g$ kJ/(kg K)
1.00	6.322	0.0006	0.03224	200.83	360.83	160.00	1.0035	1.6163
2.00	6.420	0.0043	0.03124	202.26	369.38	167.12	1.0085	1.6160
3.00	6.522	0.0080	0.03027	203.70	369.92	166.22	1.0138	1.6157
4.00	6.630	0.0113	0.02934	205.15	370.46	165.31	1.0189	1.6154
5.00	7.043	0.0158	0.02844	206.60	370.99	164.39	1.0241	1.6151
6.00	7.360	0.0198	0.02767	208.06	371.63	163.46	1.0293	1.6148
7.00	7.482	0.0239	0.02673	209.52	372.04	162.52	1.0344	1.6145
8.00	7.710	0.0280	0.02592	211.00	372.56	161.56	1.0396	1.6143
9.00	7.943	0.0322	0.02514	212.48	373.07	160.60	1.0448	1.6140
10.00	8.180	0.0366	0.02438	213.96	373.58	159.61	1.0500	1.6137
11.00	8.424	0.0410	0.02365	215.46	374.08	158.62	1.0552	1.6134
12.00	8.672	0.0456	0.02296	216.96	374.57	157.61	1.0604	1.6131
13.00	8.926	0.0501	0.02228	218.47	375.06	156.58	1.0656	1.6128
14.00	9.186	0.0548	0.02160	219.99	375.54	155.55	1.0708	1.6125
15.00	9.451	0.0596	0.02097	221.52	376.02	154.49	1.0760	1.6122
16.00	9.722	0.0645	0.02035	223.06	376.48	153.43	1.0812	1.6118
17.00	9.999	0.0695	0.01975	224.60	376.95	152.34	1.0865	1.6115
18.00	10.281	0.0746	0.01917	226.16	377.40	151.24	1.0917	1.6112
19.00	10.570	0.0798	0.01861	227.72	377.85	150.13	1.0970	1.6109
20.00	10.864	0.0852	0.01806	229.29	378.29	148.99	1.1023	1.6105
21.00	11.166	0.0907	0.01754	230.87	378.72	147.84	1.1076	1.6102
22.00	11.472	0.0963	0.01703	232.47	379.14	146.68	1.1129	1.6098
23.00	11.785	0.0921	0.01653	234.07	379.56	145.49	1.1182	1.6094
24.00	12.104	0.0980	0.01605	235.69	379.97	144.29	1.1235	1.6091
25.00	12.430	0.1041	0.01559	237.31	380.37	143.08	1.1288	1.6087
26.00	12.763	0.1003	0.01514	238.94	380.75	141.81	1.1342	1.6083
27.00	13.102	0.0967	0.01470	240.59	381.12	140.53	1.1396	1.6079
28.00	13.448	0.0932	0.01427	242.24	381.50	139.25	1.1450	1.6074
29.00	13.801	0.0900	0.01386	243.91	381.86	137.95	1.1504	1.6069
30.00	14.160	0.0869	0.01346	245.60	382.21	136.61	1.1558	1.6065
31.00	14.527	0.0840	0.01307	247.29	382.55	135.26	1.1613	1.6060
32.00	14.900	0.0813	0.01269	248.99	382.87	133.88	1.1668	1.6055
33.00	15.281	0.0789	0.01233	250.72	383.19	132.47	1.1723	1.6049
34.00	15.669	0.0766	0.01197	252.46	383.49	131.03	1.1779	1.6044
35.00	16.065	0.0745	0.01162	254.21	383.78	129.57	1.1833	1.6038
36.00	16.469	0.0726	0.01129	255.97	384.06	128.09	1.1889	1.6032
37.00	16.879	0.0710	0.01096	257.75	384.32	126.56	1.1945	1.6026
38.00	17.297	0.0695	0.01064	259.55	384.56	125.01	1.2001	1.6019
39.00	17.723	0.0681	0.01033	261.27	384.79	123.43	1.2058	1.6012
40.00	18.157	0.0668	0.01002	263.00	385.01	121.81	1.2115	1.6005
41.00	18.599	0.0656	0.00973	264.66	385.21	120.16	1.2173	1.6000
42.00	19.049	0.0645	0.00944	266.32	385.39	118.47	1.2230	1.5995
43.00	19.507	0.0636	0.00916	267.91	385.55	116.74	1.2289	1.5991
44.00	19.974	0.0628	0.00889	269.52	385.70	115.00	1.2347	1.5987
45.00	20.449	0.0621	0.00862	271.06	385.82	113.16	1.2405	1.5983
46.00	20.932	0.0615	0.00836	272.61	385.92	111.31	1.2465	1.5983
47.00	21.424	0.0610	0.00810	274.09	386.00	109.40	1.2524	1.5983
48.00	21.925	0.0610	0.00786	275.60	386.05	107.45	1.2587	1.5982
49.00	22.435	0.0610	0.00761	276.63	386.08	105.45	1.2648	1.5981
50.00	22.953	0.0610	0.00738	277.69	386.08	103.39	1.2710	1.5980
51.00	23.481	0.0610	0.00715	278.79	386.05	101.26	1.2772	1.5980
52.00	24.018	0.0610	0.00692	279.91	386.00	99.08	1.2835	1.5983
53.00	24.564	0.0610	0.00670	281.07	386.00	96.83	1.2900	1.5989
54.00	25.120	0.0610	0.00648	282.27	386.00	94.50	1.2965	1.5993
55.00	25.685	0.0610	0.00627	283.51	386.00	92.09	1.3031	1.5997
56.00	26.260	0.0610	0.00606	284.79	386.00	89.60	1.3098	1.6002
57.00	26.845	0.0610	0.00585	286.11	386.00	87.02	1.3166	1.6008
58.00	27.440	0.0610	0.00565	287.49	386.00	84.33	1.3235	1.5782
59.00	28.044	0.0610	0.00545	288.92	386.00	81.52	1.3305	1.5761
60.00	28.660	0.0610	0.00525	290.42	386.00	78.61	1.3375	1.5736

Table of saturated values for: R404A, R.125/143a/134a (44/52/4), R404A

T °C	p Bar	v <sub>l</sub> dm <sup>3</sup> /kg	v <sub>g</sub> m <sup>3</sup> /kg	T <sub>l</sub> K	T <sub>g</sub> K	h <sub>l</sub> kJ/kg	h <sub>g</sub> kJ/kg	s <sub>l</sub> kJ/kg K	s <sub>g</sub> kJ/kg K
61.00	29.285	14549	0.00506	307.99	383.53	75.55	1.3453	1.5714	
62.00	29.901	14807	0.00487	310.63	382.96	73.32	1.3629	1.6087	
63.00	30.567	15120	0.00468	313.36	382.29	69.52	1.3807	1.6508	
64.00	31.275	15488	0.00449	316.19	381.51	65.31	1.3988	1.6926	
65.00	31.992	15822	0.00429	319.14	380.60	61.46	1.3773	1.6990	
66.00	32.712	16228	0.00410	322.23	379.54	57.31	1.3861	1.6950	
67.00	33.362	16682	0.00391	325.49	378.29	52.79	1.3961	1.6906	
68.00	33.964	17204	0.00371	328.96	376.77	47.81	1.4052	1.6453	
69.00	34.617	17814	0.00350	332.71	374.89	42.18	1.4158	1.5391	
70.00	35.402	18469	0.00327	336.86	372.63	36.60	1.4271	1.4912	
71.00	36.138	19470	0.00300	341.51	369.77	27.26	1.4409	1.5188	
72.00	36.887	20681	0.00269	344.87	347.34	2.47	1.4501	1.4571	
72.07	37.315	20940	0.00266	345.61	346.61	0.00	1.4549	1.4649	

Copyright © 1999 Dep. of Energy Engineering, OTU  
M.J. Dikrup & H.J.H. Kluibin

PT. TEACH INTEGRATION  
Romp. Perkahan Cipitapuri Blok C/3/3 Berupang Batam

Phone: +62 778 323 768  
Fax: +62 778 323 768  
E-mail: teachintegration@gmail.com

<http://teachintegration.wordpress.com>

Tabel D3. Properties Udara

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
<b>Air</b>							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.683
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.693
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709



## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Tasikmalaya pada tanggal 05 April 1991 dengan nama Asep Alamsyah Ramadani (biasa dipanggil “asal”) dan merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh sekolah dasar di SDN 1 Pakemitan namun melanjutkan di SDN Ciawi IV dari kelas 2 sampai dengan lulus. Kemudian penulis melanjutkan sekolah menengah pertama pada tahun 2003 di MTs. Muh 6 Al-Furqan-Singaparna. Tahun 2006 penulis melanjutkan studi di SMAN 1 Ciawi dan lulus pada tahun 2009. Pada tahun 2009 sebelum kelulusan SMA penulis mendapatkan kabar diterima di UI jurusan Kimia-FMIPA namun karena satu dan lain hal penulis tidak mengambil kesempatan tersebut dan akhirnya melanjutkan di Politeknik Negeri Bandung (POLBAN) jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara bidang Ilmu Rekayasa sampai dengan lulus D3. Dan pada 2012 penulis memutuskan untuk kembali melanjutkan studi jenjang Strata-1 dan memilih ITS sebagai tempat melanjutkan studi tersebut. Pada bulan Februari tahun 2013 alhamdulillah penulis dinyatakan lulus seleksi LJ Teknik Mesin ITS. Di ITS penulis banyak belajar baik bersama teman reguler atau pun LJ tanpa pandang bulu dan status. Selama kuliah di ITS penulis juga banyak terlibat dalam proyek audit energi seperti di Pertamina RU III Dumai, Medco E & P Rimau, Pertamina RU IV Plaju dan Pertamina RU VI Balongan. Selain itu, pada tahun 2014 penulis dipercaya untuk menjadi Koordinator Lab Pendingin hingga akhirnya lulus sidang pada 20 Maret 2015

Alamat email Penulis: [kang.asepalamsyahr@gmail.com](mailto:kang.asepalamsyahr@gmail.com)

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*